

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura

Dipartimento di Ingegneria Edile, Civile e Architettura

**Dal rilievo laser scanner all'analisi strutturale per la
valutazione della vulnerabilità sismica del patrimonio
storico-architettonico.**

Il caso studio della Torre del Borgo di Recanati

**From terrestrial laser scanner survey to structural analysis
and seismic assessment of historical cultural heritage.**

The case study of Torre del Borgo in Recanati

RELATORE:
Prof. Ing. Francesco Clementi

TESI DI LAUREA DI:
Anna Di Blasio

CORRELATORE:
Prof. Ramona Quattrini

Anno Accademico 2018-2019

A mamma e papà, la mia forza.

Sommario

1	Introduzione.....	1
2	Dalla nuvola di punti all'analisi agli elementi finiti.....	3
2.1	La nuvola di punti come sistema informativo: lo stato dell'arte.....	3
2.1.1	Sensori ottici attivi: il laser scanner terrestre.....	6
2.2	Il dato di scansione per l'analisi strutturale.....	9
2.3	Analisi strutturale.....	14
2.3.1	La modellazione agli elementi finiti.....	16
3	Il caso studio.....	19
3.1	Inquadramento territoriale: la città di Recanati.....	19
3.1.1	Rischio sismico in Italia e sismicità storica di Recanati.....	21
3.2	Inquadramento storico.....	25
3.3	Lo stato di fatto.....	29
3.3.1	Il restauro del 2015.....	29
3.3.2	La Torre oggi.....	37
3.4	Le strutture in muratura.....	46
3.4.1	Caratteristiche meccaniche e risposta sismica.....	47
3.4.2	Le strutture a torre.....	53
4	Rilievo e trattamento dei dati.....	57
4.1	Il rilievo della Torre del Borgo.....	58
4.1.1	Il laser scanner Scan Station LEICA P40.....	60
4.1.2	Il laser scanner Leica RTC360 3D.....	62
4.1.3	Posizione delle stazioni di acquisizione.....	66
4.1.4	Piante, prospetti e sezioni.....	69
4.2	Confronto con rilievo tradizionale.....	76
4.3	Fasi della realizzazione del modello dalla nuvola di punti.....	82
4.3.1	Trattamento dei dati in Cyclone.....	82
4.3.2	Creazione ed editing del modello mesh in Geomagic Wrap.....	84
4.3.3	Ultime modifiche in 3DReshaper.....	88

4.3.4	Creazione del modello chiuso in Rhinoceros.....	91
4.3.5	Conversione del modello in Inventor.....	92
4.3.6	Importazione in Midas FEA e creazione del modello agli elementi finiti ..	93
4.4	Fasi della realizzazione del modello diretto.....	99
4.4.1	Importazione della Point Cloud in Autocad.....	99
4.4.2	Creazione del modello 3D in Autocad.....	100
4.4.3	Conversione del modello in Inventor.....	100
4.4.4	Importazione in Midas FEA e creazione del modello a elementi finiti ...	101
4.5	Valutazioni qualitative e quantitative sui modelli.....	102
4.5.1	Comparazione tra Point Cloud e modello indiretto.....	102
4.5.2	Comparazione tra Point Cloud e modello diretto.....	105
4.5.3	Tempi computazionali.....	108
5	Analisi strutturale.....	111
5.1	Analisi modale.....	111
5.1.1	Modello dalla Nuvola.....	113
5.1.2	Modello da Autocad.....	115
5.2	Operational Modal Analysis (OMA).....	118
5.2.1	Strumentazione impiegata.....	119
5.2.2	Layout dei sensori.....	121
5.2.3	Processo di identificazione dinamica.....	123
5.3	Calibrazione dei modelli.....	130
5.3.1	Calibrazione del modello dalla Nuvola.....	130
5.3.2	Calibrazione del modello diretto.....	134
6	Conclusioni.....	139

Indice delle Figure

Figura 2.1 – Comparazione tra le portate del laser a tempo di volo e quello a differenza di fase.....	7
Figura 2.2 - Classificazione dei metodi per la realizzazione di un modello solido (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).....	11
Figura 2.3 - Elementi brick.....	16
Figura 3.1 – Vista panoramica della città oggi	20
Figura 3.2 - Vista aerea del territorio di Recanati ai primi del Novecento	20
Figura 3.3 -- Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido.....	21
Figura 3.4 - Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale pubblicata da INGV.....	22
Figura 3.5 - Estratto della classificazione sismica al 2015, tratto dal sito http://esse1-gis.mi.ingv.it	24
Figura 3.6 - Rischio sismico dei Comuni della Provincia di Macerata	24
Figura 3.7 - Panorama degli inizi del '900: a destra la Torre del Borgo.....	28
Figura 3.8 – A sinistra, la torre nel 1868, anno in cui era ancora affiancata dal Palazzo dei Priori; a destra 1937: in occasione della (mancata) visita del Duce fu eretto un arco trionfale temporaneo.....	28
Figura 3.9 - Livello 3: la sala adibita a uso abitativo	32
Figura 3.10 - Livello 3: focus sulle pareti intonacate e sugli impianti a vista.....	32
Figura 3.11 - Livello 3: la trave lignea utilizzata come cavidotto	32
Figura 3.12 - Stato di conservazione della muratura.....	33
Figura 3.13 - A sinistra un infisso fatiscente, a destra un tratto della scalinata che collega le varie quote.....	33
Figura 3.14 - Livello 4: Il falso architettonico del soppalco chiuso in legno	34
Figura 3.15 - Il vecchio meccanismo dell'orologio.....	34
Figura 3.16 – Livello 6: il collegamento verticale all'ultimo piano.....	34
Figura 3.17 - Livello 6: il soppalco grigliato sopra le campane	35
Figura 3.18 - Focus sul livello 5 e sul sistema delle campane.....	35
Figura 3.19 - Livello 6: intonaco distribuito a macchie per nascondere le imperfezioni del paramento murario	35
Figura 3.20 – Livello 6: stato di conservazione delle murature.....	36
Figura 3.21 – Livello 7: organizzazione dell'esterno	36
Figura 3.22 – Livello 7: in primo piano i profili tubolari e le antenne che si alternano tra i merli	36
Figura 3.23 – Viste panoramiche di Piazza Giacomo Leopardi.....	37
Figura 3.24 - Prospetti: in alto a sinistra lato sud, a seguire lato est (ingresso) e in basso i lati nord e ovest .	38
Figura 3.25 – Reception museo	39
Figura 3.26 – Primo collegamento verticale: scale su arco rampante	39
Figura 3.27 - Ingresso.....	39
Figura 3.28 – Livello 3: panoramica dello spazio a doppia altezza	40
Figura 3.29 – Il percorso verticale, ricavato nello spessore della muratura, che conduce alle quote superiori	40
Figura 3.30 – Livello 4: in basso	41
Figura 3.31 – Il meccanismo restaurato dell'orologio	41
Figura 3.32 – Livello 4: vista dal basso del soppalco in acciaio e vetro	41

Figura 3.33 – Livello 4: in alto.....	42
Figura 3.34 – Livello 5: il sistema campanario	42
Figura 3.35 – Il sistema strutturale della cella campanaria	42
Figura 3.36 – Collegamento tra campane e livello 6	43
Figura 3.37 – Livello 6: soppalco grigliato e scala di collegamento con la quota superiore	43
Figura 3.38 – Dettaglio delle nervature della volta a crociera	43
Figura 3.39 – Livello 7: la terrazza.....	44
Figura 3.40 – Livello 7: a destra la porta di accesso a questa quota.....	44
Figura 3.41 - Dai monti Sibillini al mare Adriatico	44
Figura 3.42 - Vista sulla città di Recanati.....	45
Figura 3.43 - Vista sulla Piazza Giacomo Leopardi	45
Figura 3.44 - Tipi di murature: in alto a sinistra e a seguire muro a sacco, muro a una testa in foglio, muro a una testa, muro a due teste, muro a tre teste, muro a quattro teste	47
Figura 3.45 - (a) comportamento di malta e laterizio; (b) comportamento della muratura	48
Figura 3.46 – A sinistra: trasmissione dei carichi con giunti sfalsati, a destra: giunti non sfalsati	50
Figura 3.47 - Simulazione di forze che agiscono ortogonalmente al piano della parete (da Touliatos, 1996)	51
Figura 3.48 - Simulazione di forze che agiscono nel piano della parete (da Touliatos, 1996)	51
Figura 3.49 - Comportamento scatolare di un edificio in muratura sottoposto all'azione sismica (Vallucci , Quagliarini, & Lenci, 2013)	52
Figura 3.50 – Come la rigidità dell'orizzontamento influenza la risposta all'azione sismica: (a) solaio deformabile in assenza di cordolo; (b) solaio deformabile e cordolo di piano; (c) solaio rigido e cordolo di piano (Vallucci , Quagliarini, & Lenci, 2013).....	52
Figura 3.51 - (Mondello, 2013).....	54
Figura 3.52 - Situazioni principali di danno per campanili isolati (Doglioni, Moretti, & Petrini, 1994) (Di Tommaso & Casacci, 2013)	56
Figura 4.1 – In alto e a seguire: target battuto in campagna e posizioni dello strumento RTC360 Leica	64
Figura 4.2 - Alcune delle fasi del rilievo del soppalco al livello 6 e della copertura al livello 7	65
Figura 4.3 - Il laser scanner Scan Station P40	65
Figura 4.4 - Mappa delle stazioni esterne	66
Figura 4.5 – Posizioni del laser scanner e dei target nella fase di rilievo	67
Figura 4.6 – A sinistra le scansioni effettuate il primo giorno di rilievo con lo strumento Scan Station P40 (S), a destra quelle del secondo giorno con il laser scanner Leica RTC 360 (J)	68
Figura 4.7 - Pianta quota +0,99 m scala 1:100.....	69
Figura 4.8 - Pianta quota+5,38 m scala 1:100.....	69
Figura 4.9 - Pianta quota +8,00 m scala 1:100.....	70
Figura 4.10 - Pianta quota +10,10 m scala 1:100.....	70
Figura 4.11 - Pianta quota +16,08 m scala 1:100	71
Figura 4.12 - Pianta quota +18,13 m scala 1:100	71
Figura 4.13 - Pianta quota +26,38 m scala 1:100	72
Figura 4.14 - Pianta quota +28,27 m scala 1:100.....	72
Figura 4.15 - A sinistra prospetto est (ingresso), a destra prospetto ovest	73

Figura 4.16 - A sinistra prospetto sud, a destra prospetto nord	74
Figura 4.17 - A sinistra sezione B-B', a destra sezione A-A' scala 1:200	75
Figura 4.18 - Quota +0,99 m scala 1:100	77
Figura 4.19 - Quota +5,38 m scala 1:100	77
Figura 4.20 - Quota +8,00 m scala 1:100	78
Figura 4.21 - Quota +10,10 m scala 1:100	78
Figura 4.22 - Quota +16,08 m scala 1:100	79
Figura 4.23 - Quota +18,13 m scala 1:100	79
Figura 4.24 - Quota +26,38 m scala 1:100	80
Figura 4.25 - Quota +28,57 m scala 1:100	80
Figura 4.26 - Confronto tra sezioni: a sinistra B-B' a destra A-A' scala 1:200.....	81
Figura 4.27 - Rappresentazione a colori delle acquisizioni: lato Nord-Ovest	82
Figura 4.28 - Rappresentazione in RGB delle acquisizioni: lato Nord-Ovest	83
Figura 4.29 - Rappresentazione a colori delle acquisizioni: lato Sud-Est.....	83
Figura 4.30 - Rappresentazione in RGB delle acquisizioni: lato Sud-Est.....	83
Figura 4.31 - Nuvola di punti: 52 stazioni	84
Figura 4.32 - Unione delle stazioni e nuvola pulita.....	84
Figura 4.33 - Creazione delle mesh: 2.007.919 triangoli e 10.561 fori	85
Figura 4.34 -Irregolarità nelle mesh.....	85
Figura 4.35 - Mesh riparata	86
Figura 4.36 Mesh Doctor: in rosso i triangoli che devono essere riparati.....	86
Figura 4.37 -Il modello a seguito della decimazione: è costituito da 60.000 triangoli	87
Figura 4.38 -Confronto: a sinistra i triangoli derivati dalla decimazione, a destra i triangoli dopo il remesh..	87
Figura 4.39 - Modello finale.....	88
Figura 4.40 - Modello importato da Geomagic.....	89
Figura 4.41 - Modello finale ottenuto dopo la levigazione: 78523 triangoli	89
Figura 4.42 - Confronto globale tra il modello in Geomagic (sinistra) e quello finale in 3D Reshaper (destra)	90
Figura 4.43 - Confronto dei particolari più significativi, quali beccatelli e merli, che hanno reso necessario l'ulteriore step qui descritto: a sinistra il solido in Geomagic e a destra quello in 3D Reshaper	90
Figura 4.44 - Procedura di verifica della mesh importata da 3DReshaper	91
Figura 4.45 - Verifica delle polisuperficie chiusa.....	92
Figura 4.46 - Modello in Inventor prima della divisione	92
Figura 4.47 - Modello correttamente importato in Midas FEA	93
Figura 4.48 - Parametri meccanici delle murature, NTC2018	94
Figura 4.49 - Creazione della mesh 3D	95
Figura 4.50 - Vincoli di incastro alla base della Torre	95
Figura 4.51 - Valori dei carichi di esercizio per e diverse tipologie di edificio, NTC 2018.....	97
Figura 4.52 - Valori di riferimento del carico della neve al suolo, Circolare Ministeriale n° 7 del 2019 §4.3.298	
Figura 4.53 - Nuvola di punti nel software Recap	99
Figura 4.54 - Nuvola di punti importata in Autocad	99

Figura 4.55 - Il solido modellato in Autocad.....	100
Figura 4.56 - Elaborazione finale in Inventor.....	101
Figura 4.57 - A sinistra vista assonometrica Nord-Ovest, a destra vista Sud-Est	103
Figura 4.58 - A sinistra sezione Est-Ovest, a destra sezione Nord-Sud.....	103
Figura 4.59 - Scostamento della volta a crociera nella cella campanaria	104
Figura 4.60 - A sinistra gli scostamenti del piano terra e a destra quelli nella fascia superiore	104
Figura 4.61 - A sinistra vista assonometrica Nord-Ovest, a destra vista Sud-Est	105
Figura 4.62 - A sinistra sezione Est-Ovest, a destra sezione Nord-Sud.....	106
Figura 4.63 - Scostamento della volta a crociera nella cella campanaria	107
Figura 4.64 - Scostamenti in corrispondenza del terzo piano e delle nicchie	107
Figura 4.65 - Incongruenze nella parte sommitale della torre.....	108
Figura 4.66- Confronto tra i workflow per la realizzazione dei modelli.....	109
Figura 4.67 - Confronto tra i modelli finali: a sinistra quello diretto, a destra quello indiretto.....	110
Figura 5.1 – Spostamenti e dati Modo 1 – Modello dalla Nuvola	113
Figura 5.2 – Spostamenti e dati Modo 2 – Modello dalla Nuvola	113
Figura 5.3 - Spostamenti e Modo 3 – Modello dalla Nuvola.....	114
Figura 5.4 - Spostamenti e dati del Modo 4 – Modello dalla Nuvola	114
Figura 5.5 - Spostamenti e dati del Modo 5 – Modello dalla Nuvola	115
Figura 5.6 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello da Autocad.....	115
Figura 5.7 - Spostamenti e dato Modo 2 – Modello da Autocad	116
Figura 5.8 - Spostamenti e dati Modo 3 – Modello da Autocad.....	116
Figura 5.9 - Spostamenti e dato Modo 4 – Modello da Autocad	117
Figura 5.10 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello da Autocad.....	117
Figura 5.11 - Sensore GEA II	119
Figura 5.12 - Caratteristiche del sistema GEA II.....	120
Figura 5.13 - Posizione dei sensori durante il monitoraggio.....	121
Figura 5.14 - Layout dei sensori in ogni misurazione	122
Figura 5.15 – Geometria iniziale semplificata e posizionamento dei sensori	123
Figura 5.16 – Time histories delle accelerazioni misurate dai canali 8 e 9 nella misurazione 1	124
Figura 5.17 - Diagramma delle singole densità spettrali	124
Figura 5.18 - Interfaccia del grafico di stima delle frequenze con analisi OMA-FDD.....	125
Figura 5.19 – Interfaccia del grafico della stima delle frequenze con analisi OMA-SSI.....	126
Figura 5.20 - Frequenze SSI – CVA	127
Figura 5.21 – Modello sperimentale, Modo 1	127
Figura 5.22 – Modello sperimentale, Modo 2	128
Figura 5.23 – Modello sperimentale, Modo 3	128
Figura 5.24 – Modello sperimentale, Modo 4	129
Figura 5.25 - Modello sperimentale, Modo 5.....	129
Figura 5.26 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello dalla Nuvola	131
Figura 5.27 - Spostamenti e dati Modo 2 – Modello dalla Nuvola	132
Figura 5.28 - Riferimenti e dati Modo 3 – Modello dalla Nuvola	132

Figura 5.29 - Spostamenti e dati Modo 4 – Modello dalla Nuvola	133
Figura 5.30 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello dalla Nuvola	133
Figura 5.31 - Caratteristiche dei materiali prima e dopo la calibrazione	134
Figura 5.32 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello da Autocad.....	135
Figura 5.33 - Spostamenti e dati Modo 2 – Modello da Autocad.....	136
Figura 5.34 - Spostamenti e dati Modo 3 – Modello da Autocad.....	136
Figura 5.35 - Spostamenti e dati Modo 4 – Modello da Autocad.....	137
Figura 5.36 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello da Autocad.....	137
Figura 5.37 - Caratteristiche dei materiali prima e dopo la calibrazione	138

1 Introduzione

Il presente lavoro di tesi si pone in linea sia con le ricerche degli ultimi anni, che sperimentano una commistione tra la disciplina del rilievo e quella dell'analisi strutturale, sia con gli avvenimenti dell'attualità, che ribadiscono a gran voce la necessità di mitigare gli effetti dei terremoti.

Il territorio italiano, infatti, è caratterizzato da una elevata sismicità e da un consistente patrimonio costruito: i seri danni e i collassi strutturali avvenuti di recente hanno ulteriormente sensibilizzato l'ingegneria e l'architettura a garantire una maggiore protezione da tali eventi naturali eccezionali, sulla base della conoscenza del comportamento dinamico dell'edificio.

In particolare, le strutture a torre in muratura, in virtù dell'abbondanza di casi studio, della loro configurazione geometrica e volumetrica (preminente sviluppo verticale e snellezza), di specifici fattori (ad es. il grado di ammassamento delle pareti, la presenza di eventuali strutture in adiacenza, la partecipazione in sommità di elementi architettonici snelli o vulnerabili come le celle campanarie) e delle azioni alle quali sono sottoposte, costituiscono un campione significativo per l'analisi, offrendo la possibilità di valutare il maggior numero di aspetti e di elaborare molteplici *output* e riflessioni.

Estendere la conoscenza all'intero edificio e alla sua storia è una fase preliminare e al tempo stesso cruciale per la mappatura degli indici di rischio e per la stima degli stati limite degli elementi strutturali.

Per questo motivo, è stata scelta la torre campanaria nota come Torre del Borgo, sita in piazza Giacomo Leopardi nel cuore di Recanati: si tratta di una struttura storica in muratura, anticamente annessa al Palazzo Comunale e ora distante da questo circa cinquanta metri, di pianta non propriamente quadrata che si eleva per una altezza di *35,50 metri*.

La tesi si pone anche come obiettivo quello di ampliare il campo di applicazione del rilievo digitale, guardando oltre le rappresentazioni prettamente geometriche: la *point cloud* costituisce un sistema informativo versatile e dalle grandi potenzialità, che incorre però nell'oneroso problema dell'interoperabilità tra ambienti *software*.

In continuità con altri lavori di tesi e con i test precedentemente validati, il presente lavoro vuole migliorare e ottimizzare il *workflow* che conduce alla realizzazione di un modello che possa essere a tutti gli effetti oggetto di analisi strutturale.

Nella fase successiva si effettuerà una valutazione della vulnerabilità sismica attraverso lo strumento dell'analisi agli elementi finiti, la quale attualmente è uno dei mezzi più attendibili per lo studio del patrimonio storico-architettonico.

Si tenterà di validare l'ipotesi che l'accuratezza del dato di scansione, ricalcando lo stato di fatto, porti a risultati più attendibili rispetto a quelli di una geometria meno realistica affinché si possa individuare la configurazione più rappresentativa dell'effettivo comportamento dinamico.

A livello operativo si creeranno parallelamente due modelli della Torre del Borgo: uno che ha origine dalla *point cloud* e uno realizzato secondo i convenzionali strumenti di disegno 3D: l'obiettivo finale sarà di confrontare i risultati ottenuti dalla calibrazione e ampliare le considerazioni e le osservazioni a vantaggio di questo innovativo procedimento.

2 Dalla nuvola di punti all'analisi agli elementi finiti

2.1 La nuvola di punti come sistema informativo: lo stato dell'arte

Il rilievo digitale è lo strumento di acquisizione di tutte le informazioni necessarie alla restituzione, completa e in scala, di modelli tridimensionali di architetture, strutture e territorio e si basa su varie piattaforme digitali.

Oggi il rilievo è quasi completamente digitale, in tutte le sue fasi, tanto che in letteratura questo termine è spesso sostituito con *digitalizzazione*. Infatti, negli ultimi trent'anni, gli sviluppi nel campo delle tecnologie hanno messo a punto una serie di strumenti e metodiche in grado di acquisire digitalmente le informazioni geometriche e radiometriche di oggetti tridimensionali con un grado di accuratezza e di risoluzione tali da consentirne la riproposizione come repliche virtuali della realtà (Nespeca, 2018).

“Perché il rilevamento finalizzato al restauro possa essere effettuato ai massimi livelli, deve poter utilizzare tutte le metodologie che la moderna tecnica mette a disposizione” (Docci & Maestri, Manuale di rilevamento architettonico e urbano, 2009).

Dal punto di vista metodologico, acquisizione e trattamento dati costituiscono le prime due fasi del rilievo del manufatto: sulla base di questi dati, attraverso operazioni di selezione, segmentazione e campionamento, si genera il modello, bidimensionale o tridimensionale, frutto di interpretazione e scelte del soggetto operante. A questo si aggiungono le analisi, la diagnosi e l'arricchimento concettuale per il quale il manufatto è stato rilevato: si tratti di restauro, manutenzione, progettazione, studio o preservazione. Alle acquisizioni geometriche si affianca anche il reperimento di dati altrettanto importanti: informazioni di tipo storico o semplicemente osservazioni ulteriori, come cogliere i valori percettivi dell'architettura, leggerne la struttura formale e riconoscere gli elementi primi del linguaggio che la caratterizza, insieme a indagini distruttive e non distruttive.

Dal punto di vista strumentale, i mezzi meccanici ed elettronici, *hardware* e *software*, messi in campo nel processo di digitalizzazione sono innumerevoli, in crescente aumento e in continua evoluzione (Nespeca, 2018).

Le varie tecniche di acquisizione si differenziano per l'uso di attrezzature pertinenti, ma l'enorme potenzialità di questo sistema risiede non tanto nel risultato finale di ciascuna quanto piuttosto nella possibilità di integrazione delle stesse, per ottenere un esito qualitativamente migliore. Con questa finalità, fotogrammetria e sistemi a scansione, ad

esempio, vengono spesso integrate in casi di architetture di grandi dimensioni o siti archeologici complessi, dove una tecnica da sola non basta a fornire velocemente un output completo e dettagliato (Rizzi, Voltolini, Girardi, Gonzo, & Remondino, 2007).

Le tecniche di acquisizione geometrica possono essere raggruppate in due tipologie: *image-based modelling* (fotogrammetria e fotomodellazione), che richiedono una precisa formulazione matematica, in termini di geometria proiettiva, per trasformare i dati estratti dalle immagini in coordinate metriche 3D, e *range-based modelling* (*laser scanning*), in cui si acquisiscono direttamente le informazioni geometriche 3D dall'oggetto da riprodurre (Remondino & El-Hakim, 2006) (Rinaudo, 2011) (Rinaudo, 2011) (Guidi & Remondino, 2012).

Entrambe avvengono senza un contatto diretto con l'oggetto, ma attraverso la mediazione di strumenti ottici, meccanici e informatici che ne restituiscono la rappresentazione all'interno di uno spazio cartesiano virtuale.

Le differenze tra i sistemi a sensore attivo (*range-based*) e sensore passivo (*image-based*) sono principalmente 3:

- i. I primi permettono l'ottenimento di un modello tridimensionale in nuvola di punti già nella fase di presa, mentre nel rilievo fotogrammetrico c'è bisogno di un modello matematico per trasformare l'immagine bidimensionale in coordinate tridimensionali dei punti;
- ii. Il modello da rilievo laser scanner è metricamente corretto e coerente con la realtà, mentre quello fotogrammetrico ha bisogno di essere scalato utilizzando almeno una misura nota;
- iii. L'errore di scala dei modelli laser è noto in quanto dipende esclusivamente dallo strumento di rilievo utilizzato, mentre la scala dei disegni fotogrammetrici dipende da numerosi fattori quali la distanza di presa, le caratteristiche della fotocamera e gli algoritmi utilizzati (Nespeca, 2018).

La scansione laser è quindi una tecnologia senza contatto che riproduce dettagli precisi sotto forma di nuvola di punti: è l'ideale per la misurazione di superfici sagomate e geometrie complesse, che richiederebbero ingenti quantità di dati per la loro accurata descrizione, e nel caso in cui sia impraticabile adottare metodi diretti e tradizionali (Clini, El Mehtedi, Nespeca, Ruggeri, & Raffaelli, 2017).

In particolare, negli scenari di intervento post-sisma, le ultime tecnologie laser scanner *all in one* impiegate oltre le normali applicazioni e integrate con metodi di rilevamento da drone, costituiscono un nuovo valido approccio in risposta ai problemi di rilevamento, sicurezza, velocità e basso costo dei sondaggi, qualità dei dati e dei modelli forniti per la valutazione dei danni o per qualsiasi azione di intervento (Clini , Quattrini, Fiori, & Nespeca , 2013).

Trasformare la *point cloud* in un sistema informativo significa:

- Svincolarsi dagli strumenti di acquisizione;
- Lavorare su un prodotto comune e molto diffuso;
- Risolvere problematiche di gestione di grandi moli di dati;
- Estrapolare ulteriori informazioni a partire da elaborazioni geometriche;
- Evitare la fase di modellazione, certamente più lunga e onerosa (Nespeca, 2018).

Grazie a queste caratteristiche, un modello 3D pienamente interoperabile e ricco di contenuti informativi si presta a tuttotondo anche all'ambito delle architetture storiche, in quanto costituisce la base geometrica della conoscenza per qualsiasi attività di restauro o monitoraggio.

L'arricchimento del rilievo geometrico-storico con database tematici e descrittivi, con la segmentazione dell'oggetto nei suoi componenti semantici o con la creazione di vere e proprie banche dati ontologiche è il cuore pulsante della piattaforma *HBIM (Heritage Building Modelling)* la cui sfida più grande è quella di dimostrare la fattibilità dell'intero approccio per forme architettoniche complesse, a partire dalla scansione del laser scanner (Quattrini, Malinverni, Clini , Nespeca, & Orlietti, 2015).

2.1.1 Sensori ottici attivi: il laser scanner terrestre

Un sensore ottico attivo è concepito per misurare distanze ed è in grado di restituire direttamente un grande numero di coordinate 3D della superficie misurata. Tra quelli più diffusi in ambito architettonico vi sono i laser scanner (terrestri o aerei) e i sistemi a proiezione di frange (o luce strutturata): entrambi sono costituiti da un emettitore di luce e da un sensore per registrarne la risposta.

Nello specifico, nel laser scanner la luce emessa permette di ottenere direttamente la posizione spaziale dell'area o del singolo punto rilevato e in tempi brevissimi si possono codificare milioni di punti correttamente posizionati nello spazio. Rispetto alle tecniche tradizionali dove l'operatore selezionava i punti di ripresa effettuando scelte ben precise, non è richiesto alcun lavoro preliminare, anzi, essendo un dispositivo *all in one* che integra diversi sistemi, si avrà una successiva interpretazione ed elaborazione dei dati. L'iter operativo di una campagna di rilievo con laser scanner consiste quindi in due fasi distinte: acquisizione e restituzione delle misure attraverso l'elaborazione dei dati.

Le tipologie di Laser scanner terrestre sono tre:

- Sistemi a triangolazione: questi sistemi utilizzano il principio della triangolazione, calcolando la distanza di tre punti nello spazio, dove il primo corrisponde al punto da rilevare, il secondo allo strumento stesso e il terzo a un sensore posto a una data distanza fissata in precedenza. Il raggio laser emesso viene ricevuto, dopo la riflessione sull'oggetto, da un diverso sensore per poi tornare al mittente. Sono dispositivi di portata limitata, utilizzati per oggetti di dimensioni ridotte o per dettagli architettonici: di solito rilevano a una distanza compresa tra 30 cm e 200 cm poiché hanno una accuratezza dell'ordine dei micron.
- Sistemi a tempo di volo (*Time of Flight, ToF*): sono costituiti da un diodo che emette il raggio laser e da un sistema di specchi che consente di spostare tale raggio da un allineamento all'altro lungo una serie ideale di linee verticali e di spostarsi, da sinistra verso destra con passo predefinito. Il raggio emesso colpisce la superficie dell'oggetto (target) e, dopo essere stato riflesso e modificato nell'intensità (riflettanza), ritorna allo strumento, dove una unità di misura interna calcola con estrema precisione il tempo impiegato tra l'emissione e il ricevimento del raggio laser. Conoscendo la velocità della luce e moltiplicandola per la metà del tempo di volo trascorso tra emissione e ricezione si ottiene la

distanza dell'oggetto. Il software converte tali dati in coordinate cartesiane, x , y e z , riferite rispetto al centro dello strumento considerato l'origine $O = (x = 0, y = 0, z = 0)$ e come ulteriore informazione calcola l'intensità, quale valore della luce non assorbita e quindi restituita dai differenti materiali costituenti l'edificio. Sono in grado di misurare distanze elevate, fino a qualche centinaio di metri, e hanno una precisione di pochi millimetri ma, di contro, sono i più lenti.

- Sistemi a differenza di fase (*Phase Shift*): acquisiscono come dato la differenza di frequenza d'onda (differenza di fase), cioè viene messa una luce strutturata a frequenza alternata e lo strumento ne stima le interferenze dovute all'interazione con la superficie dell'oggetto da rilevare tra il momento dell'emissione e quello del ritorno allo strumento. Il range operativo è compreso tra 80 m e 300 m e impiegano solo pochi minuti per generare nuvole ricche e dettagliate.

I sistemi a tempo di volo e a differenza di fase sono detti "distanziometrici" e sono utilizzati per opere di medio-grande dimensione.

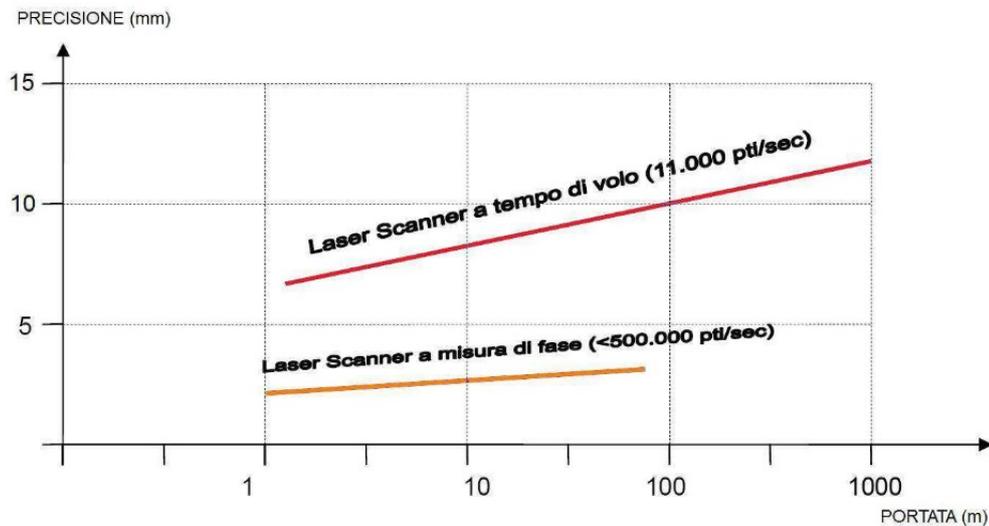


Figura 2.1 – Comparazione tra le portate del laser a tempo di volo e quello a differenza di fase

Lo scanner possiede una serie di caratteristiche metrologiche che solitamente variano secondo le modalità operative: la risoluzione orizzontale dei punti, parametro impostato prima dell'avvio della misurazione ed è funzione del grado di dettaglio che si vuole raggiungere, e l'incertezza, la parte aleatoria dell'errore e non è correggibile da processi di taratura. Le fonti di errore per i sensori a scansione sono: il segnale perso in rumore

(*speckle*), la dimensione dello *spot*, lo spostamento della misura e il rumore (penetrazione del segnale) e gli artefatti di misura (salti di spigoli e riflettanza) (Nespeca, 2018).

Il prodotto finale di una scansione è una nuvola di punti, un insieme di milioni di punti ciascuno descritto da tre coordinate cartesiane e dall'intensità della riflettanza, intesa come la quantità di energia che un determinato punto di una superficie, colpito da un raggio luminoso, reinvia nello spazio in tutte le direzioni (Docci, Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città, 2007).

La nuvola di per sé non ha dati radiometrici, dunque lo strumento comprende una fotocamera esterna ma appartenente al sistema oppure è abbinato a una ulteriore fotocamera, con risoluzione più alta, utilizzata direttamente dall'operatore mantenendo lo stesso punto di vista delle stazioni effettuate con il laser scanner. Questa dotazione permette di catturare il colore reale dei punti creando immagini ad alta risoluzione proiettate nella nuvola, che viene mappata attribuendo un valore RGB a ogni elemento acquisito.

Il primo passo del processo di elaborazione dei dati è l'unione delle diverse nuvole di punti in un'unica nuvola: questa operazione è cruciale e deve garantire il massimo livello di precisione possibile, riducendo al minimo i margini di errore tramite il corretto allineamento delle varie stazioni utilizzando strategici punti di riferimento.

2.2 Il dato di scansione per l'analisi strutturale

Le costruzioni storiche in muratura sono strutture complesse che identificano la maggior parte del patrimonio architettonico non solo italiano ma anche europeo: la mancanza di informazioni sulla risposta alle sollecitazioni alle quali sono sottoposte, in particolare a quella sismica, rappresenta un problema reale e stimolante allo stesso tempo. Generalmente, gli edifici storici in muratura sono in grado di resistere in sicurezza ai carichi verticali, ma hanno scarse prestazioni contro quelli laterali, come dimostrato dalla attività tellurica che di recente ha investito il nostro paese. Indagarne il comportamento è dunque un compito impegnativo perché funzione di molti fattori, come le proprietà dei materiali, la geometria del volume e le connessioni tra muri ortogonali strutturali ed elementi non strutturali (Clementi , Gazzani, Poiani , & Lenci , 2016).

In letteratura la valutazione delle architetture storiche prevede:

- i. Misurazioni geometriche e topografiche con l'individuazione delle principali fasi costruttive, anche attraverso l'analisi dei documenti storici, e indagini sui danni, compresa la loro evoluzione nel tempo
- ii. Valutazione del danno reale, definendo delle variabili che descrivono il comportamento della struttura
- iii. Misurazione e interpretazione delle sollecitazioni in alcune aree di interesse mediante prove statiche, per computare il comportamento dinamico del manufatto
- iv. Sviluppo di modelli numerici, di complessità gradualmente sempre più avanzata, in grado di riprodurre le prove sperimentali
- v. Simulazioni numeriche per esaminare la risposta strutturale, in accordo con le condizioni di carico (incluse le azioni orizzontali introdotte da un terremoto) (Korumaz, et al., 2017).

L'accuratezza dei dati influisce sul processo decisionale e di analisi: alle inesattezze delle misurazioni conseguono modelli semplicistici, che riescono a fornire una valutazione approssimata delle condizioni reali della struttura, infatti una geometria meno realistica porta necessariamente a risultati meno precisi.

Per queste ragioni, la tecnologia del laser scanner terrestre (*TLS*) risulta essere un potente e versatile mezzo per condurre in sicurezza rapide misurazioni, senza entrare in contatto con l'opera.

Queste osservazioni confermano che l'affermazione di tecniche di rilevamento più evolute e precise, avvenuta nell'ultimo decennio, ha suscitato l'interesse dell'ingegneria civile: solo negli ultimi anni, però, le informazioni morfo-geometriche combinate con la caratterizzazione dei materiali, ha costituito un dato di *input* per la valutazione e le analisi del comportamento strutturale (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019). Questa commistione tra le due discipline rappresenta allo stesso tempo un nuovo approccio e il punto di partenza per affinare il procedimento stesso e ottenere risultati sempre più attendibili e fruibili.

In particolare, la valutazione e l'analisi che si intende perseguire è quella dell'elemento finito: il *FEA Finite Element Analysis* consente di discretizzare il *continuum* in un *set* di elementi finiti interconnessi da nodi e, a tal fine, è necessario fornire un modello tridimensionale dell'oggetto di studio.

Il limite di questo *workflow* è che la nuvola di punti non viene direttamente usata per realizzare il modello computazionale, infatti, alcuni tentativi prevedono la possibilità di utilizzo di dati LIDAR (*Light Detection and Ranging*) (Caroti, Franconi, & Piemonte, 2012) per produrre modelli 3D utili per l'analisi strutturale degli edifici effettuata con il *software SAP2000*, ma sono stati rilevati problemi che hanno portato a numerose elaborazioni e modifiche dei dati originali.

Altre tecniche per la modellazione di geometrie complesse consistono nella ricostruzione del volume dividendolo in sezioni che poi vengono estruse e allineate (Caroti, Franconi, & Piemonte, 2012) oppure la geometria originale viene semplificata in una serie di poligoni bidimensionali chiusi da sequenziali sezioni dell'edificio ottenute con una spaziatura costante che dipende dalla risoluzione desiderata per il modello agli elementi finiti (Bitelli, et al., 2016).

Tutti i percorsi vagliati hanno come comune denominatore, al di là degli strumenti a disposizione e della lunghezza del *workflow*, le scelte dell'operatore che, lavorando in un campo sperimentale, non sempre riesce a raggiungere l'obiettivo che si era prefissato.

L'approccio considerato finora il più performante dal punto di vista dell'accuratezza è quello che contempla la creazione di una *mesh* dalla *point cloud* e la successiva conversione in *NURBS*, considerata il confine dell'oggetto che poi il programma convertirà in solido (Korumaz, et al., 2017).

Alla luce di queste considerazioni si propone uno schema sulla classificazione dei metodi per la generazione di modelli solidi (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

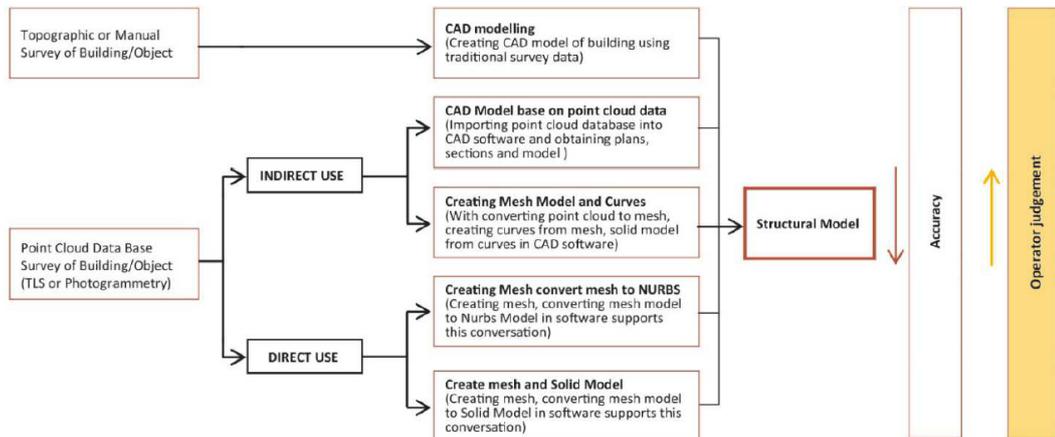


Figura 2.2 - Classificazione dei metodi per la realizzazione di un modello solido (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019)

La grande potenzialità è che a partire da questa strumentazione è possibile acquisire nuvole dense di punti che permettono di:

- Rappresentare le coordinate tridimensionali della geometria della superficie dell'oggetto
- Conoscere, oltre alla configurazione esterna, anche quella interna e trattare questi due livelli di informazioni in un unico sistema di riferimento tridimensionale
- Fornire la posizione e la forma della struttura e dei suoi elementi (ad es. gli spessori murari, la posizione e lo spessore dei solai, deviazioni orizzontali e verticali, rotazione e inclinazioni dei muri)
- Leggere il quadro fessurativo e mappare le deformazioni dal confronto con l'oggetto di riferimento
- Ricavare un modello sia dell'opera nella sua interezza sia del singolo elemento che la costituisce (Caroti, Franconi, & Piemonte, 2012)

Questo *input* però, deve essere convertita in prima approssimazione in un modello a *mesh* e poi ancora in un modello 3D poligonale affinché possa diventare il corretto dato

per i *software* di verifica strutturale: l'eterogeneità dei dati e l'interoperabilità tra i vari ambienti di programmazione rappresentano due patologie del sistema informativo, alle quali si sta cercando di ovviare con il *BIM (Building Information Modelling)* ossia un processo che definisce un modello informatico completo, dinamico, interdisciplinare e condiviso (Barazzetti, et al., 2015).

Nell'ambito del patrimonio storico-architettonico si fa riferimento all' *HBIM (Heritage Information Modelling)*: l'uso della nuvola di punti per la gestione e documentazione dell'edificio storico offre una nuova prospettiva e spunti di ricerca interessanti, non solo per l'ambito di studio approfondito in questa sede (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

A questo punto si possono intraprendere due approcci: il primo prevede di considerare gli edifici in muratura come strutture continue, discretizzandole con il metodo agli elementi finiti (*FEM – Finite Element Method*); il secondo valuta la muratura come un insieme di blocchi soggetti a contatti unilaterali di attrito, che viene quindi modellata come una serie di elementi distinti. L'analisi *FEM* è sicuramente il metodo più versatile e più comunemente usato per la simulazione numerica delle risposte statiche non lineare e dinamiche di grandi strutture 3D (Clementi, Gazzani, Poiani, & Lenci, 2016).

Modellare significa quindi creare un modello matematico discreto in grado di interpretare il più verosimilmente possibile il comportamento fisico reale della struttura continua, dove per modello matematico si intende oltre che la discretizzazione geometrica del manufatto, anche la semplificazione dei carichi applicati e dei vincoli imposti, nonché dei materiali costituenti lo stesso.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione è la quantità di triangoli che costituiscono il modello geometrico (*Digital Surface Model, DSM*): un numero troppo elevato, cioè un livello di dettaglio (*Level of Detail, LoD*), eccessivo presenta potenzialmente più errori e incoerente di un modello semplificato. Una buona soluzione è fornita dai software di reverse engineering, che permettono di adattare un DSM alle necessità proprie dell'analisi *FEM*: è possibile correggere eventuali incongruenze geometriche e topografiche e di convertirlo da mesh a superfici NURBS o a modelli solidi, generalmente compatibili con la maggior parte dei programmi di analisi strutturale.

Resta ancora irrisolta la questione relativa al numero di elementi che caratterizzano il DSM, poiché molti software strutturali non sono in grado di importare un numero elevato

di triangoli e, qualora lo permettano, il tempo computazionale richiesto per la loro analisi e per l'ottenimento di un risultato è davvero elevato (Visintini & Spangher, 2015).

È possibile, quindi, discretizzare una qualsiasi geometria che riproduca il più fedelmente possibile lo stato di fatto e allo stesso tempo creare un modello contenente tutte le informazioni necessarie per la valutazione della vulnerabilità sismica, comprese le proprietà meccaniche e tutte le caratteristiche dei materiali.

Il presente lavoro fa tesoro di tutte le sperimentazioni precedenti e in particolare alle metodologie sperimentata nel Minareto Eğri, ad Aksaray Turchia, (Korumaz, et al., 2017), alla Chiesa di Santa Maria di Portono, ad Ancona, (Quagliarini, Clini, & Ripanti, 2017) e alla torre campanaria del Duomo di San Ciriaco, ad Ancona (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

Ciò che si auspica è di contribuire alla risoluzione del problema di generazione del modello *FEM*, soprattutto nell'ambito del *cultural heritage*, e di fornire un *workflow* facilmente riproducibile e indipendente da qualsiasi software specifico

Sicuramente sperimentazioni future tenteranno di superare i problemi di interoperabilità incontrati che, seppur affrontati con successo, contribuiscono a rallentare la durata complessiva del *workflow*. Quindi l'obiettivo generale è di avere modelli sempre più sensibili alla realtà con informazioni metriche di grande dettaglio ma con tempi di calcolo inferiori (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

2.3 Analisi strutturale

Attualmente lo strumento di calcolo strutturale più potente è quello agli elementi finiti (*FEM*): attraverso la modellazione di *mesh* solide si è in grado di replicare ogni dettaglio dell'irregolarità della muratura, rendendo possibile l'analisi di edifici di forma qualunque. Inizialmente tale metodo era confinato allo studio di comparti e non di edifici completi: le opere di grandi dimensioni presentano un numero elevatissimo di gradi di libertà che comportava un grande impiego di potenza di calcolo.

La necessità, sempre più incalzante, di effettuare analisi *FEM* su edifici storici deriva dalla riduzione della vulnerabilità sismica, che ha spostato l'attenzione a monte, aumentando l'interesse per il monitoraggio della salute del patrimonio architettonico, caratterizzato da esemplari fin troppo longevi.

Risulta, pertanto, vantaggiosa e strategica l'approfondita conoscenza della risposta dinamica dello stato di fatto, punto di partenza per tracciare delle linee guida che assicurino la protezione e il contenimento dei meccanismi fessurativi. È in questo contesto che si inserisce il monitoraggio strutturale: con l'espressione *Structural health monitoring (SHM)* o *Monitoraggio dello stato di una struttura* si intende la misura continua e regolare e la successiva analisi dei parametri strutturali e ambientali chiave in condizioni di esercizio (compresi eventi critici, quali i terremoti), con la finalità di identificare e localizzare danni e di effettuare interventi di manutenzione (Housner, et al., 1997).

Tale sistema è formato da vari sensori che rilevano grandezze ambientali e la risposta strutturale alle sollecitazioni: hanno posizioni periferiche e sono direttamente connessi, tramite cavi, a un sistema di acquisizione dati centralizzato, che li aggrega, immagazzina ed elabora. Qualora il numero dei sensori fosse consistente, il sistema di acquisizione risulterebbe sovraccaricato, per questo i sistemi cablati sono via via sostituiti da sensori wireless a basso costo, che consentono di dislocare la conoscenza sull'intera rete di monitoraggio.

Questi dati concorrono all'identificazione dinamica della struttura, che consente di ottenere la risposta della stessa in termini di frequenze proprie, modi di vibrazioni e coefficienti di smorzamento. In tal senso l'analisi modale operativa (*Operational Modal Analysis, OMA*) è quella più utilizzata per valutare il comportamento delle strutture civili: il principale vantaggio è quello di misurare i parametri modali mentre operano in condizioni ambientali reali. Dal momento che ogni danno cambia le proprietà fisiche dell'edificio, allo stesso modo cambia la risposta modale quindi un sondaggio dinamico

ripetuto nel tempo e combinato con un modello FEM della struttura può essere usato per il monitoraggio del suo comportamento, specialmente in seguito a importanti scosse di assestamento.

Gli edifici storici sono solitamente molto impegnativi a causa delle loro uniche configurazioni e le grandi incertezze relative alla modellazione; per questi motivi non si può far affidamento a una combinazione di dati facilmente identificata. Alcuni parametri incerti, ad es. il modulo di Young della muratura, sono stati selezionati e modificati iterativamente per minimizzare le differenze nelle frequenze naturali tra FEM e OMA. Il modello ottimale sarà quello che mostrerà un buon accordo in frequenze e forme modali per tutti i modelli identificati (Clementi , Perdicca, Formisano , Catinari , & Lenci , 2017).

2.3.1 La modellazione agli elementi finiti

Le analisi di strutture complesse avvengono attraverso una discretizzazione, ovvero il passaggio da equazioni di equilibrio e di congruenza, valide nel continuo, a sistemi di equazioni algebriche più semplici. Questo passaggio è stato, ad oggi, semplificato con l'avvento degli elementi finiti: è possibile rappresentare un sistema di punti, detti *nod*i, che definiscono la forma del modello. A loro volta, i nodi sono collegati tra di loro attraverso gli elementi finiti veri e propri, celle di forma predefinita che costituiscono la *mesh*, una maglia alla quale vengono associate le proprietà dei materiali e le caratteristiche geometriche.

Segue che è fondamentale che il numero dei nodi sia adeguato a rappresentare le caratteristiche geometriche.

I modelli *FEM* possono essere creati usando elementi di vario tipo, quali monodimensionali (*travi 1D*), bidimensionali (*shell 2D*) o tridimensionali (*solidi 3D*, nel caso della Torre del Borgo di tipo *brick*).

In particolare, il *brick* è un componente che ha da 4 a 27 nodi, ciascuno dei quali ha tre gradi di libertà corrispondenti alle tre traslazioni e non viene trasferita rigidità per gli altri gradi di libertà. Grazie a questa configurazione, una maglia di questo tipo non ha rotazioni ed è possibile analizzare le rotazioni della struttura nella sua globalità. La capacità espressiva di questo elemento è quella di essere in grado di interpretare uno stato tensionale tridimensionale.

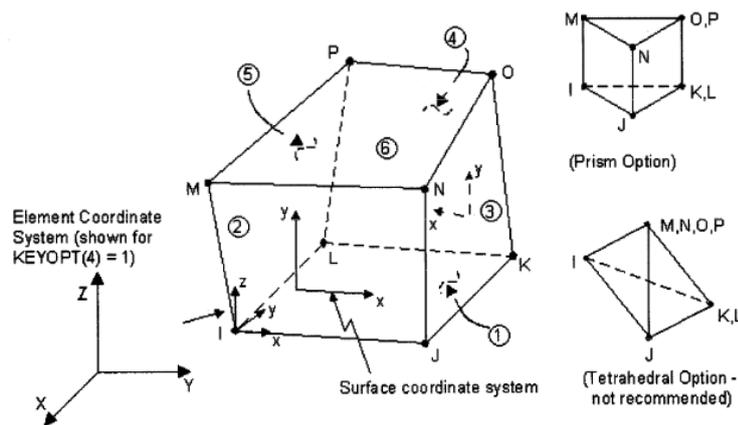


Figura 2.3 - Elementi brick

A questo punto, il problema si traduce in equazioni di legame tra le componenti di spostamento dei nodi, cioè fra i nodi e le forze applicate sulle *mesh*. Il vantaggio degli

elementi finiti è quello di poterlo applicare a qualsiasi struttura con l'inconveniente, però, di poter avere una certa approssimazione dei risultati.

La modellazione agli elementi finiti è stata effettuata con l'ausilio del software *Midas FEA*, che prevede:

- Creazione del modello solido geometrico;
- Creazione dei vincoli di incastro tra le varie pareti murarie;
- Definizione e assegnazione delle *mesh*;
- Definizione e assegnazione dei vincoli di base;
- Definizione e assegnazione dei carichi statici.

Inizialmente tale metodo era confinato allo studio di parti strutturali e non a edifici completi: strutture di grandi dimensioni presentano un numero elevatissimo di gradi di libertà con un conseguente elevato impiego di potenza di calcolo, che in passato non era generalmente disponibile, ma oggi risulta lo strumento di calcolo strutturale più potente.

3 Il caso studio

3.1 Inquadramento territoriale: la città di Recanati

Le origini della città di Recanati sono precedenti all'avvento dei Romani: i primi cenni di civilizzazione si svilupparono nei pressi dei due fiumi Musone e Potenza, infatti, quando in età preromanica giunsero i Piceni, il più antico nucleo abitativo si era già insediato. L'attuale città, nonostante un racconto leggendario riconduca le sue origini a quelle di una antica colonia romana, *Recinetum*, poi distrutta dai Goti, fu istituita nella seconda metà del XII secolo, quando i signori di tre castelli limitrofi decisero di unirsi. Recanati nasceva quindi dall'unione dei borghi di *Monte Morello*, *Monte San Vito* e *Monte Volpino*, e il suo territorio si trovava sotto l'influenza del vescovo di Numana. Il Comune fu retto fino al 1203 da due consoli e successivamente da un podestà: nel corso del '200 la città dovette difendersi dalla vicina Osimo, contro la quale edificò il castello di Montefiore, presso Montefano. Nel 1289, per conquistare il suo favore, l'imperatore del Sacro Romano Impero, Federico II, le concesse il privilegio di costruire un porto sulla costa, atto che sancì la nascita della futura Porto Recanati. Passata poi dalla parte della Chiesa in conflitto con lo stesso imperatore, ottenne il titolo di città e di sede vescovile come ricompensa per aver ospitato il vescovo Rinaldo in fuga dalla ghibellina Osimo. Il 1294 è l'anno in cui la tradizione associa l'arrivo della Santa Casa di Loreto, che all'epoca era territorio recanatese: per secoli fu chiamata Villa Santa Maria fino a quando, nel 1586, il papa Sisto V, non elevò Loreto a città. Le vicende dei primi del '300 furono alquanto cruente: nel 1312 i ghibellini espugnarono la città macchiandosi di numerosi delitti e il pontefice avignonese Giovanni XXII le tolse il titolo di sede vescovile, assegnandolo a Macerata. Due anni dopo, Recanati fu riconquistata dai guelfi, ma i ghibellini, come ultimo atto, ne incendiarono una parte, perdendo irreversibilmente le sue fortificazioni e il Palazzo dei Priori. A discapito di quanto sperassero i nemici, la città mantenne il suo pregio: fu istituita nuovamente la sede vescovile, subentrò tra le *civitates magna*e della Marca ed ebbe il diritto di poter battere moneta. All'inizio del '400 la città fu insignita del titolo di *Justissima Civitas*, che compare ancora oggi sotto lo stemma comunale: fu presa a modello per aver redatto un proprio corpo giuridico e per la grande competenza dei suoi magistrati, le cui sentenze erano richieste anche in grandi città. Grazie alla vicinanza con il porto e all'abbondante flusso di pellegrini che accorrevano alla Villa Santa Maria, Recanati rappresentò, per i secoli '400 e '500, un centro nevralgico per gli scambi commerciali con

l'altra sponda dell'Adriatico. A partire dal '600, il pregio di Recanati si affievolì: fu privata del castello di Loreto e gradualmente si uniformò ai tanti paesini della Marca, caratterizzati da una economia agricola e da una società statica. L'inerzia cittadina fu scossa dall'occupazione napoleonica e la partecipazione ai moti risorgimentali fu causa di traumi insanabili. Il *14 giugno 1798* Recanati offrì i natali alla controversa personalità ritenuta da molti il maggior poeta dell'Ottocento italiano: Giacomo Leopardi. Nel *1860* l'annessione dello Stato della Chiesa al Regno d'Italia integrò la storia del piccolo comune a quella dell'Italia di oggi. Nel *1893* un tratto del litorale fu scorporato dal suo territorio a formare il nuovo comune di Porto Recanati.

La morfologia della città ricalca il crinale di un colle e fu protetta da una cerchia robusta di mura nella quale si aprivano stretti varchi chiusi da porte: ad oggi le più caratteristiche sono Porta San Domenico, Porta Cerasa e Porta San Filippo, che consentivano l'accesso al centro della città.



Figura 3.1 – Vista panoramica della città oggi



Figura 3.2 - Vista aerea del territorio di Recanati ai primi del Novecento

3.1.1 Rischio sismico in Italia e sismicità storica di Recanati

L'Italia è uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo: si trova nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella eurasiatica e per questo è sottoposta a spinte compressive che causano l'accavallamento dei blocchi di roccia. Considerando inoltre che il secolare patrimonio edilizio che caratterizza i panorami delle nostre città spesso non presenta criteri antisismici in quanto non previsti all'epoca, si ha che il rischio sismico è un tema molto attuale e sensibile. L'Italia fu tra i primi ad affrontare la problematica della vulnerabilità sismica: il 20/03/2003 con l'Ordinanza PCM 3274 si è classificato il territorio nazionale come sismico, suddividendolo in 4 zone con pericolosità sismica decrescente che corrispondono a 4 classi di accelerazione massima del suolo con probabilità di accadimento del 10% in 50 anni:

Zona sismica	Descrizione	accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [ag]	accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [ag]
1	Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi fortissimi terremoti.	$a_g > 0,25 \text{ g}$	0,35 g
2	Zona dove possono verificarsi forti terremoti.	$0,15 < a_g \leq 0,25 \text{ g}$	0,25 g
3	Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari.	$0,05 < a_g \leq 0,15 \text{ g}$	0,15 g
4	E' la zona meno pericolosa, dove i terremoti sono rari ed è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica.	$a_g \leq 0,05 \text{ g}$	0,05 g

Figura 3.3 -- Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido

Il rischio sismico è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo ed è rappresentato dalla combinazione di tre fattori: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. La pericolosità è definita come la probabilità che in una data area e in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi la soglia di accelerazione di picco di interesse. È una caratteristica fisica del territorio e restituisce la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti: valutare la sismicità del sito implica individuare aree che, in occasione di una scossa sismica, possono essere soggette a fenomeni di

amplificazione. L'approccio alla stima della pericolosità può essere di tipo deterministico o probabilistico: nel primo caso si analizzano i danni osservati in occasione di eventi tellurici avvenuti in un certo sito, nel secondo si quantifica la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche, ed è questo il metodo maggiormente utilizzato. In Italia l'*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)* ha pubblicato una mappa di pericolosità in funzione dell'accelerazione di picco orizzontale, considerando un tempo di ritorno pari a *475 anni*: i colori associati ad accelerazioni più basse indicano aree meno pericolose, ma anche se la frequenza di terremoti forti è minore non significa che siano totalmente assenti.

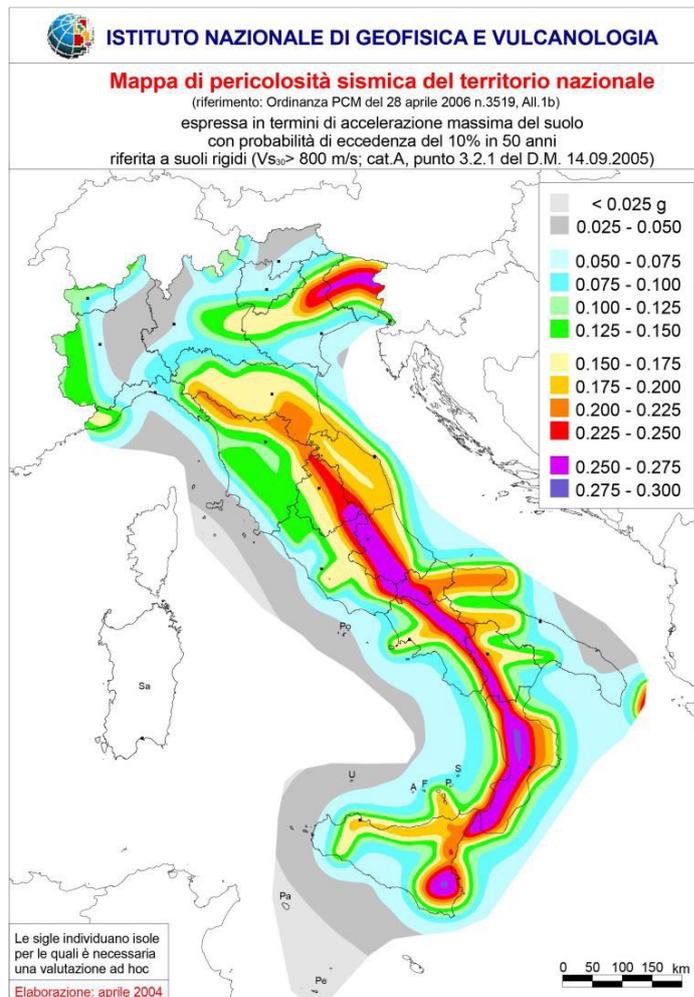


Figura 3.4 - Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale pubblicata da INGV

Per esposizione si intende la possibilità che un territorio subisca un danno più o meno elevato in termini economici, di vite umane e di beni architettonici e culturali: nel nostro Paese è un fattore fortemente rilevante a causa della densità del tessuto abitativo e alla presenza di un grande patrimonio storico, artistico e monumentale. Stimare questo parametro è alquanto arduo in quanto è difficile ipotizzare con precisione le conseguenze di un terremoto nei diversi momenti del giorno e dell'anno. Ulteriore amplificazione è data dal fatto che, molto spesso, gli edifici storici detengono all'interno un considerevole patrimonio artistico che deve essere necessariamente inglobato nel computo.

Dal momento che pericolosità ed esposizioni sono parametri sui quali non è possibile intervenire, si cerca di ridurre la vulnerabilità delle costruzioni attraverso politiche di prevenzione e messa in sicurezza.

La vulnerabilità è la propensione di una struttura a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità: è un fattore che può discernere dalla tipologia edilizia dell'edificio stesso, da una progettazione inadeguata, dalla scadente qualità dei materiali, da una errata modalità di costruzione oppure da una scarsa manutenzione. Dal punto di vista tecnico è quantificata da un indicatore che mette in relazione la capacità di resistenza della struttura, che corrisponde al raggiungimento di uno stato limite (in genere lo Stato Limite di Salvaguardia della vita, SLV, e lo Stato Limite di Collasso, SLC), e la richiesta, in termini di resistenza e/o spostamento, del sisma.

Per quanto concerne il territorio di Recanati, l'archivio dell'INGV riporta un evento disastroso avvenuto nel 1741: si tratta di un fenomeno tellurico di lunga durata e di magnitudo 6.2 che ha interessato i territori di Marche e Umbria. Gli effetti più gravosi si ebbero nel fabrianese e nella valle dell'Esino, ma anche a Recanati la scossa fu terribile.

Attualmente Recanati non presenta faglie attive ma resta comunque una zona a rischio poiché inglobata in un complesso sistema che coinvolge tutto l'Appennino umbro-marchigiano. Attualmente, sulla base della mappa di pericolosità sismica, Recanati è una zona sismica 2, definita da un valore dell'accelerazione orizzontale su suolo rigido e pianeggiante compreso tra $0,15 < a_g \leq 0,25g$.

Si osserva che anche i comuni limitrofi e la maggior parte di quelli della provincia di Macerata rientrano nei parametri della zona 2.

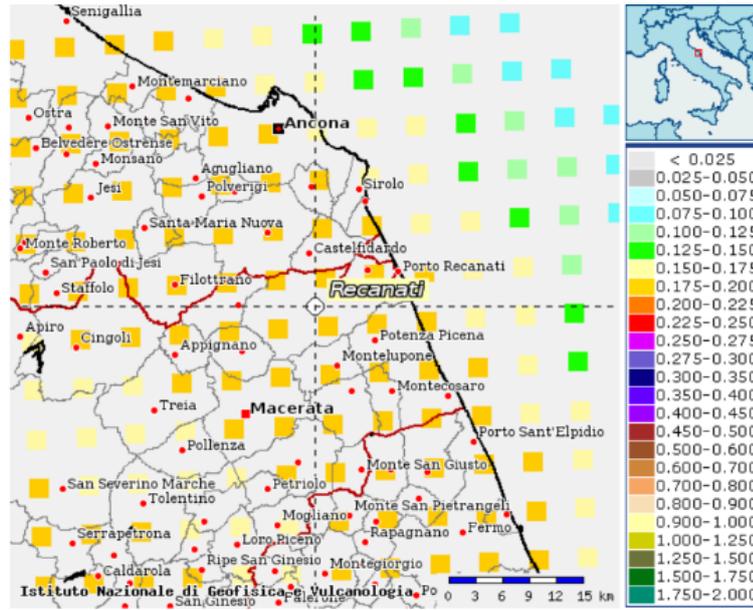


Figura 3.5 - Estratto della classificazione sismica al 2015, tratto dal sito <http://esse1-gis.mi.ingv.it>

Comune	Zona Sismica	Comune	Zona Sismica
Apiro	2	Montefano	2
Appignano	2	Montelupone	2
Belforte del Chienti	2	Morrovalle	2
Bolognola	2	Muccia	1
Caldarola	2	Penna San Giovanni	2
Camerino	2	Petriolo	2
Camporotondo di Fiastrone	2	Pieve Torina	1
Castelraimondo	2	Pioraco	2
Castelsantangelo sul Nera	1	Poggio San Vicino	2
Cessapalombo	2	Pollenza	2
Cingoli	2	Porto Recanati	2
Civitanova Marche	2	Potenza Picena	2
Colmurano	2	Recanati	2
Corridonia	2	Ripe San Ginesio	2
Esanatoglia	2	San Ginesio	2
Fiastra	2	San Severino Marche	2
Fiuminata	2	Sant'Angelo in Pontano	2
Gagliole	2	Sarnano	2
Gualdo	2	Sefro	2
Loro Piceno	2	Serrapetrona	2
MACERATA	2	Serravalle di Chienti	1
Matelica	2	Tolentino	2
Mogliano	2	Treia	2
Monte Cavallo	1	Urbisaglia	2
Monte San Giusto	2	Ussita	2
Monte San Martino	2	Valfornace	2
Montecassiano	2	Visso	1
Montecosaro	2		

Figura 3.6 - Rischio sismico dei Comuni della Provincia di Macerata

3.2 Inquadramento storico

La Torre del Borgo, detta anche *Turris Magna Palatii Comunis*, fu edificata nel 1160 come simbolo di unità e della conquistata libertà comunale: deriva, infatti, dalla fusione dei tre castelli, Monte Morello, Monte San Vito e Monte Volpino, che sancirono la nascita della città di Recanati. È una costruzione coeva al Palazzo dei Priori e la sua configurazione iniziale prevedeva che fosse unita a questo.

Fu adoperata come deposito di munizioni, custodia dei prigionieri più efferati e divenne anche una sicura cassaforte dei preziosi che i pellegrini donavano alla Madonna del santuario di Loreto.

Per secoli la città di Recanati è stata teatro dell'avvicinarsi dei guelfi e dei ghibellini e l'attuale merlatura ghibellina sui beccatelli appartiene a una ricostruzione posteriore all'incendio del 1332, epilogo dell'ennesimo scontro tra le due fazioni. Tale rifacimento prevedeva inoltre l'arretramento della facciata del Palazzo Priorale, messo in opera nel 1467 sull'asse del suo lato orientale, permettendo alla torre di recuperare un valore architettonico autonomo, poi accresciuto con il suo completo isolamento a seguito della sistemazione della Piazza Giacomo Leopardi e con la costruzione del nuovo Palazzo comunale nel 1872.

A seguito della demolizione del vecchio edificio, gli ornamenti che ne fregiavano la facciata furono fissati sulla torre:

- i. Sul prospetto sud è posto il bassorilievo in bronzo raffigurante la Traslazione della Santa Casa, opera di Pier Paolo Jacometti. È grazie alla mediazione del Pomarancio, con cui collaborò fino al 1615, che Jacometti ricevette le prime commissioni come scultore. In particolare, nel 1613, fu incaricato dalla comunità di Recanati di realizzare, insieme al fratello Tarquinio, prima il busto bronzeo del cardinale Antonio Maria Gallo da collocare sulla facciata del palazzo comunale, opera ormai perduta, poi la grande formella raffigurante la Traslazione. Solo con l'abbattimento del vecchio edificio, fu trasferita sulla torre civica.
- ii. Sul lato sud e al di sopra del bassorilievo si trova il quadrante dell'orologio in pietra bianca del 1562: il meccanismo che ha governato l'orologio del manufatto dalla seconda metà dell'Ottocento fino agli anni '70 del Novecento è stato costruito da Antonio Galli, figlio della gloriosa stirpe di orologiai marchigiani. Si tratta di una macchina divisa in tre "treni": treno del tempo al centro, treno della

suoneria a ore e quarti con ripetizione al centro e treno della suoneria meridiana a destra. I tre pesi che permettevano alla macchina di funzionare scendevano lungo il pozzo della torre e venivano ricaricati giornalmente da un incaricato che doveva provvedere anche alla manutenzione ordinaria del meccanismo. Come tutti gli orologi della famiglia Galli, anche questo era stato realizzato con fine ed esatta lavorazione di forgia: le ruote dentate sono in ottone; gli ingranaggi poggiano su un telaio realizzato in profili di piatto. Negli anni il meccanismo ha subito dei restauri e delle modifiche non proprio reversibili, come l'applicazione di cuscinetti o riparazione con saldatura ad arco. Fu operativo fino agli *anni 70* del Novecento, quando la ditta Adriano de Santis la sostituì con un modello elettromeccanico, all'epoca all'avanguardia, ma oggi è governato da una centralina elettronica con rimessa automatica dell'ora esatta con satellite, che provvede anche al suono automatico delle campane. La presenza dell'orologio pubblico è stata fondamentale nel corso della storia, per questo ricopre una posizione privilegiata, nella parte più alta, e ben visibile da tutti.

- iii. Sul prospetto ovest è possibile ammirare un bassorilievo in marmo bianco raffigurante il leone rampante con spada e corona, emblema della città, opera di Andrea Sansovino. La scelta di questo simbolo è molto ricorrente non solo in Italia ma anche in Spagna, in Francia, in Germania e in Inghilterra in quanto è a esso associata l'idea di forza e di coraggio, di dominio e vigilanza, di magnanimità e generosità. La sua posizione araldica è rampante, cioè di profilo, dritto sulle zampe posteriore in atto di arrampicarsi;
- iv. Sul lato ovest, sotto al leone, si trova una epigrafe con i versi de "Le ricordanze" nei quali Giacomo Leopardi fa riferimento alla Torre del Borgo.
- v. Sul lato ovest, nell'angolo destro e a circa due metri di altezza è possibile scorgere la formella da cui si possono ricavare le dimensioni dell'antico mattone della città e cioè 33,5x14,5 centimetri;
- vi. Sulla parete ovest era comparsa l'insegna lapidea che Fermo donò a Recanati in segno di amicizia.

Le campane poste inizialmente sulla torre furono depredate nel 1799 durante l'occupazione della Marca e solo nel 1833 furono ripristinate. Durante le ultime vicende

belliche furono confiscate e fuse e solo nel 1975 delle nuove campane furono restituite alla torre.

Il concerto campanario è costituito da quattro campane automatizzate per il suono a slancio nelle festività. Solo le prime due sono provviste anche di elettrobattente per il suono delle ore e delle mezze. Ogni campana ha il suo nome e il suo ruolo:

- Il campanone: usato per le solennità per il battito delle ore e per il suono dell'Angelus alle ore 12,00. Pesa circa 2.200 Kg e venne rifuso dalla "Premiata Fonderia Pontificia Giuseppe Pasqualini e Figli" nel 1975 dal vecchio elemento esistente rotto. È l'ultima campana Pasqualini perché durante la lavorazione morì l'ultimo fonditore della secolare famiglia Pasqualini, infatti la campana fu portata a termine dagli operai. Al momento del trasporto alla cella campanaria con la gru, venne agganciata erroneamente a una sola maniglia e si spezzò, dunque fu forata sulla testa per applicarvi una staffa di acciaio;
- La mezzana (o campana del consiglio): è fusa dai fratelli Baldini di Sassoferrato nel 1833, anno in cui rifusero tutto il concerto e il suo ruolo è quello di battere le mezze ore;
- La mezzanella (o campana della scuola): insieme alla mezzana deriva dalla fusione dei Baldini nel 1833 e suona automaticamente a slancio per due minuti nei giorni di scuola (escluse le festività) dal lunedì al sabato dal 15 settembre al 15 giugno.
- La piccola (o campana dei caduti): è stata rifusa nel dopoguerra dalla fonderia Pasqualini ed è dedicata ai caduti di tutte le guerre.

Le immagini che seguiranno sono tratte dall'Archivio di un grande storico recanatese, Roberto Anconitani, e dalla raccolta fotografica "*Le Ricordanze. Recanati 1868-1939. Storia, costume e società*" (Buschi & Buschi, 2000).



Figura 3.7 - Panorama degli inizi del '900: a destra la Torre del Borgo

“Fra il 1868 e il 1937 sono avvenute a Recanati trasformazioni che per secoli erano sembrate impossibili. Le immagini fotografiche richiamano alla memoria ciò che era stato e ciò che è cominciato da quei tempi.

In parte è stata la Poesia a ispirare il cambiamento. In parte è stato il lavoro, la capacità della gente, la lotta contro la povertà, la ricerca di una maggiore giustizia sociale, la gioia di poter creare un mondo nuovo con le proprie mani e l’intelligenza di una comunità intera” (Buschi & Buschi , 2000).



Figura 3.8 – A sinistra, la torre nel 1868, anno in cui era ancora affiancata dal Palazzo dei Priori; a destra 1937: in occasione della (mancata) visita del Duce fu eretto un arco trionfale temporaneo

3.3 Lo stato di fatto

3.3.1 Il restauro del 2015

Prima dell'intervento di restauro, gli unici livelli della torre civica visitabili e utilizzati per esposizioni temporanee erano il piano terra e il primo, a seguito di precedenti e recenti lavori di risanamento.

Gli altri cinque piani riportavano vere e proprie cicatrici quali segni dell'utilizzo inconsapevole di un bene architettonico di grande rilevanza storico-artistico-culturale.

In prossimità del terzo livello, raggiunto attraverso la ripida e angusta scalinata ricavata nello spessore della muratura perimetrale, si presentava una sala adibita ad abitazione, probabilmente del custode o di chi aveva l'incombenza di provvedere all'accesso alla torre e all'utilizzo delle campane. In questo ambiente, controsoffittato all'occorrenza a una altezza di 3 metri dal piano di calpestio, è possibile individuare tutti gli abusi derivanti dalla conversione di una sala medievale in un ambiente domestico:

- Copertura delle pareti con un sottile strato di intonaco;
- Aggiunta di tramezzature interne;
- Chiusura delle antiche nicchie esistenti;
- Interventi di dubbia natura architettonica in corrispondenza degli archi;
- Introduzione di scadenti infissi lignei alle finestre;
- Collocamento di contatori elettrici e macchinari per il funzionamento automatico dell'orologio.

Al quarto piano si trovava il meccanismo dell'orologio, ormai dismesso, e prosegue l'iter degli ignari interventi sulle murature e nelle aperture.

Percorrendo una scalinata incassata, coperta da volte a botte, si arriva al quinto livello, destinato a ospitare le quattro campane che compongono la batteria di dotazione: è un ambiente ovviamente aperto sui quattro lati che ha una struttura portante in acciaio e una pavimentazione in massetto di cemento.

Per mezzo di una scala a chiocciola in plastica, aggiunta di recente, si giunge al sesto piano, un locale soppalcato, cioè realizzato con travi in acciaio e una griglia metallica che costeggia i quattro lati (lasciando un vuoto al centro) che funge da piano di calpestio. Qui sono più evidenti, rispetto ai due piani sottostanti, le ingiurie nei trattamenti superficiali: macchie di intonaco, di varie epoche e colorazioni, sono state apposte, quasi certamente

per nascondere l'ingannevole precisione nel posizionamento dei conci della muratura e interventi con malta cementizia sanavano le lesioni sulle arcate di sostegno.

Segue una ulteriore scala a chiocciola in metallo per accedere al settimo e ultimo piano: lo stato di conservazione delle murature, dei merli di forma ghibellina e del pavimento in cotto è discreta, ciò che risulta anacronistico è la collocazione di sostegni tubolari in acciaio verniciato, con la doppia funzione di parapetto di protezione e di sostegno delle numerose antenne poste in sommità.

L'Amministrazione Comunale di Recanati era fortemente interessata alla realizzazione di un intervento di manutenzione e riqualificazione della Torre del Borgo, finalizzato al recupero funzionale degli spazi interni e a rendere accessibile, con l'ausilio dell'accompagnamento di una guida, la copertura, che regala un suggestivo panorama che va dal mare Adriatico ai monti Sibillini.

La logica che pervade la progettazione di tutti gli interventi è quella di ripristinare, per quanto ancora possibile, lo stato di fatto originario, senza realizzare falsi storici o architettonici.

In corso d'opera sono state riscontrate delle problematiche, impreviste e imprevedibili, che hanno modificato e adeguato il progetto alle nuove esigenze.

Le problematiche maggiori del primo stralcio sono state riscontrate in prossimità del terzo e del quarto piano, nei quali su tutte le pareti murarie è stato rinvenuto uno spesso strato di fuliggine di natura resinosa e compatta, rimosso per mezzo di operazioni di idrosabbatura approfondita, dal momento che le tecniche di idrolavaggio e sabbatura non avevano sortito alcun effetto.

Al centro esatto della volta a botte della quota 3 è stata osservata una anomalia statica, che ha portato alla fuoriuscita dei conci dal piano originario. Ciò è dovuto all'affissione, nella volta stessa, di una trave lignea cava, utilizzata probabilmente in epoca remota come cavidotto. Per ovviare al danno, è stato necessario provvedere alla rimozione di una parte consistente del livello superiore, al puntellamento dell'ambiente della sala 3 con relativa centinatura, alla rimozione degli elementi fuoriusciti e al riposizionamento dei conci in modo da ripristinare perfettamente la funzionalità statica.

Per le stesse motivazioni di garanzia statica, si è introdotta una cerchiatura in acciaio del foro presente sulla volta, che in passato lasciava passare il contrappeso della molla del meccanismo del vecchio orologio.

Segue la ricostruzione della pavimentazione in entrambi i livelli, fortemente degradata a seguito dei lavori.

Dal momento che nel piano 4 la porzione di soppalco esistente, realizzato con struttura lignea e chiuso con un pianellato di calpestio, risulta un falso e in seguito all'osservazione della sua dubbia consistenza statica, è stato proposto, in analogia con il ballatoio in acciaio a quota 3, un ulteriore soppalco in acciaio con piano di calpestio in vetro strutturale.

Nel secondo stralcio, vengono presi in considerazione altri interventi resi possibili grazie a nuovi finanziamenti e all'autorizzazione da parte della Soprintendenza delle Belle Arti e del Paesaggio delle Marche (prot. 47580 del 29/12/2015). L'ipotesi per la nuova configurazione è un allestimento di tipo museale che renderà fruibile il bene secondo le seguenti modalità: accesso libero dei primi quattro livelli e possibilità, dietro diretta responsabilità e/o accompagnamento, di visita delle restanti quote.

La torre ospita al suo interno il MUREC, Museo di Recanati, che attraverso un percorso verticale arricchito da schermi interattivi, permette di conoscere la storia del borgo.



Figura 3.9 - Livello 3: la sala adibita a uso abitativo

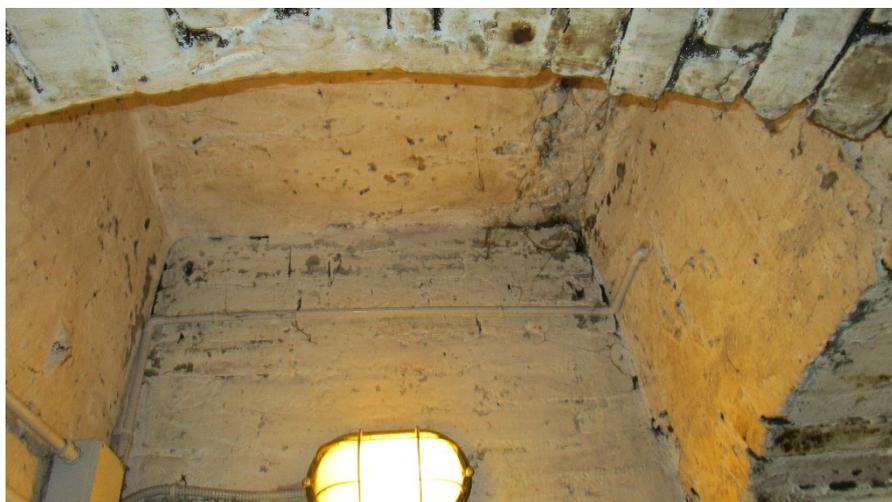


Figura 3.10 - Livello 3: focus sulle pareti intonacate e sugli impianti a vista



Figura 3.11 - Livello 3: la trave lignea utilizzata come cavidotto



Figura 3.12 - Stato di conservazione della muratura

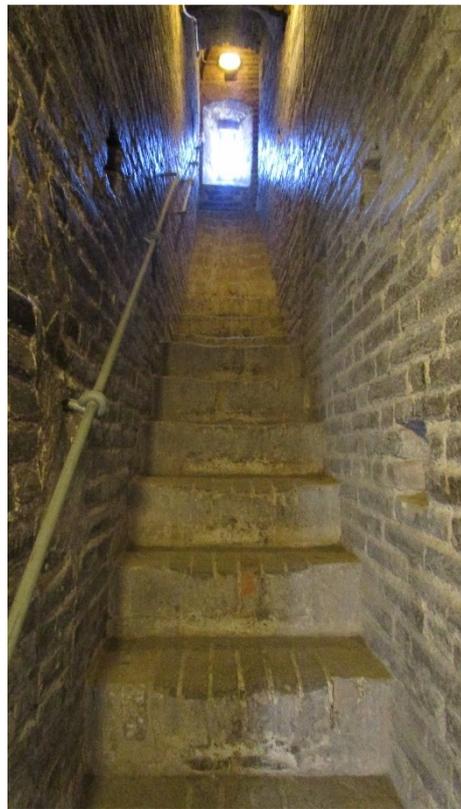


Figura 3.13 - A sinistra un infisso fatiscente, a destra un tratto della scalinata che collega le varie quote



Figura 3.14 - Livello 4: Il falso architettonico del soppalco chiuso in legno



Figura 3.15 - Il vecchio meccanismo dell'orologio



Figura 3.16 – Livello 6: il collegamento verticale all'ultimo piano



Figura 3.17 - Livello 6: il soppalco grigliato sopra le campane



Figura 3.18 - Focus sul livello 5 e sul sistema delle campane



Figura 3.19 - Livello 6: intonaco distribuito a macchie per nascondere le imperfezioni del paramento murario



Figura 3.20 – Livello 6: stato di conservazione delle murature



Figura 3.21 – Livello 7: organizzazione dell'esterno



Figura 3.22 – Livello 7: in primo piano i profili tubolari e le antenne che si alternano tra i merli

3.3.2 La Torre oggi

La torre si innalza in Piazza Giacomo Leopardi per una altezza di 35,50 metri e si sviluppa su una pianta pressoché quadrata con lato di 8,92 metri.

L'accesso è situato sul lato est in asse con la residenza comunale: inizialmente i due volumi erano un tutt'uno infatti, durante gli interventi di restauro, è stata rinvenuta al secondo livello una porta murata che probabilmente ne costituiva l'unico ingresso e allo stesso tempo il collegamento con il palazzo.

All'interno si possono distinguere sette livelli, tutti ricoperti da una volta a botte a eccezione della cella campanaria, avente volta a crociera, e della terrazza. Ai vari ambienti si è introdotti tramite delle ripide scalinate scavate all'interno della muratura perimetrale, che prendono luce da finestre e feritoie. Solo in corrispondenza degli ultimi due piani si supera una scala in acciaio per accedervi.

La torre è coronata da una merlatura ghibellina, sorretta da beccatelli sporgenti, che delimitano un suggestivo terrazzo panoramico.



Figura 3.23 – Viste panoramiche di Piazza Giacomo Leopardi



Figura 3.24 - Prospetti: in alto a sinistra lato sud, a seguire lato est (ingresso) e in basso i lati nord e ovest



Figura 3.25 – Reception museo



Figura 3.26 – Primo collegamento verticale: scale su arco rampante



Figura 3.27 - Ingresso



Figura 3.28 – Livello 3: panoramica dello spazio a doppia altezza



Figura 3.29 – Il percorso verticale, ricavato nello spessore della muratura, che conduce alle quote superiori



Figura 3.30 – Livello 4: in basso



Figura 3.31 – Il meccanismo restaurato dell'orologio

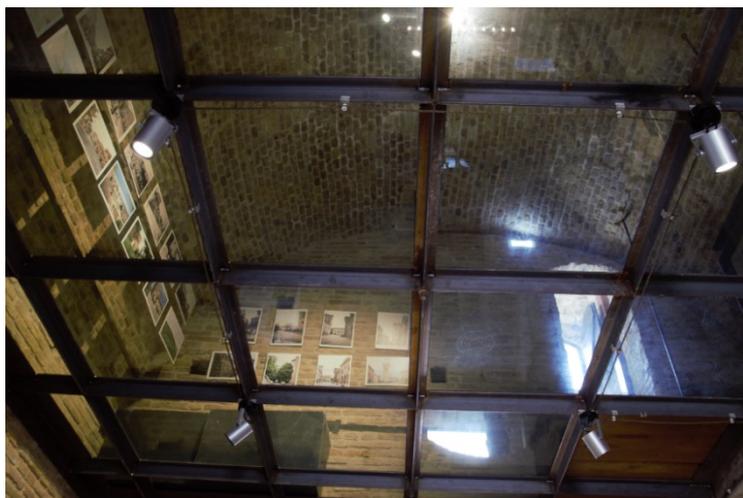


Figura 3.32 – Livello 4: vista dal basso del soppalco in acciaio e vetro



Figura 3.33 – Livello 4: in alto



Figura 3.34 – Livello 5: il sistema campanario

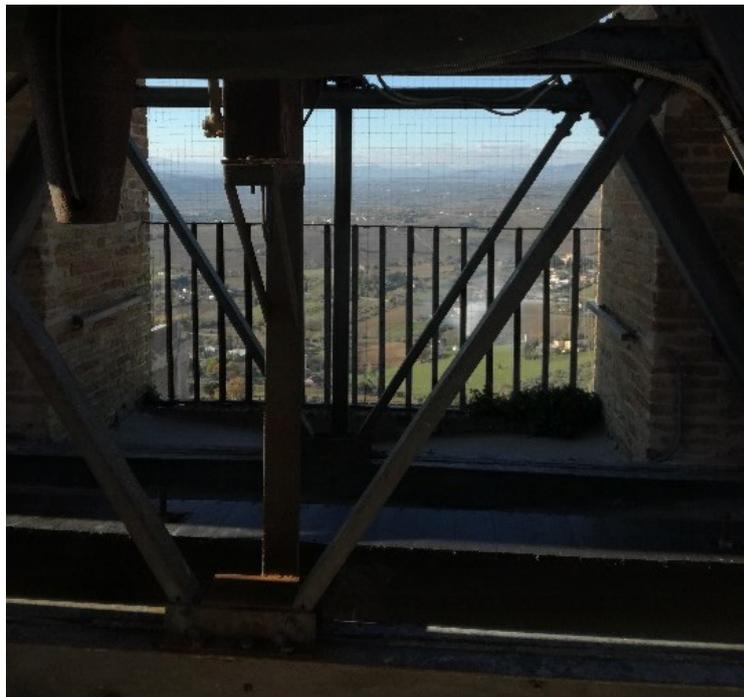


Figura 3.35 – Il sistema strutturale della cella campanaria



Figura 3.36 – Collegamento tra campane e livello 6



Figura 3.37 – Livello 6: soppalco grigliato e scala di collegamento con la quota superiore



Figura 3.38 – Dettaglio delle nervature della volta a crociera



Figura 3.39 – Livello 7: la terrazza



Figura 3.40 – Livello 7: a destra la porta di accesso a questa quota



Figura 3.41 - Dai monti Sibillini al mare Adriatico



Figura 3.42 - Vista sulla città di Recanati



Figura 3.43 - Vista sulla Piazza Giacomo Leopardi

3.4 Le strutture in muratura

Il termine *muratura* si riferisce all'assemblaggio di pietre naturali o artificiali, ad es. mattoni, in presenza o assenza di un legante, la malta: è la tecnica costruttiva più antica, sviluppatasi con l'avvento delle grandi civiltà urbane, e diffusa non solo in Italia ma anche in tutta Europa.

Gli edifici in muratura comprendono una grande varietà di tipologie edilizie in funzione della modalità costruttiva e dei materiali utilizzati. Queste variabili, infatti, rendono la muratura estremamente complessa da analizzare: il comportamento di paramenti realizzati con gli stessi materiali può differire profondamente a causa della tessitura utilizzata, della dimensione dei conci e delle caratteristiche meccaniche delle pietre e della malta.

Le pareti verticali possono essere classificate in base alla funzione, alla posizione o alla modalità di esecuzione.

Classificazione in base alla funzione:

- Muri portanti, se resistono ai carichi verticali;
- Muri controvento, se resistono ai carichi orizzontali;
- Muri di tamponamento, se separano gli ambienti dall'esterno;
- Muri divisorii, se separano gli spazi interni.

Classificazione in base alla posizione:

- Muri di fondazione;
- Muri di elevazione.

Classificazione in base alla modalità di esecuzione:

- Muri a secco, blocchi assemblati senza l'utilizzo di malta. Rientrano in questa categoria le murature a sacco: pareti con spessore più elevato, generalmente formate da due paramenti esterni di qualità migliore e uno strato interno ottenuto tramite riempimento da cui ne dipende la qualità. Il riempimento può essere costituito da semplice sabbia o inerti oppure da conglomerati legati da malte dalle proprietà variabili;
- Muri a getto, eseguiti con vari conglomerati e gettati in casseforme.

Le murature realizzate con mattoni pieni assumono comunemente diverse nomenclature a seconda dello spessore e delle diverse modalità di apparecchiatura:

- Muri a una testa in foglio (o coltello);
- Muri a una testa;
- Muri a due teste;
- Muri a tre teste;
- Muri a quattro teste.

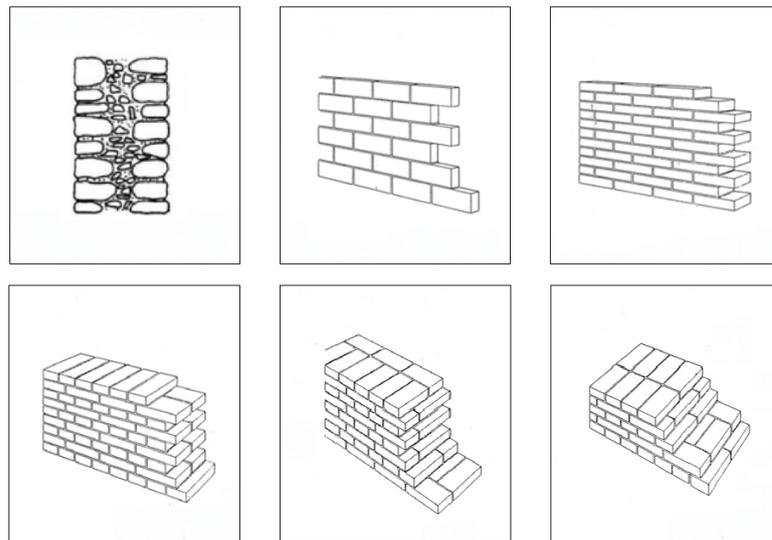


Figura 3.44 - Tipi di murature: in alto a sinistra e a seguire muro a sacco, muro a una testa in foglio, muro a una testa, muro a due teste, muro a tre teste, muro a quattro teste

3.4.1 Caratteristiche meccaniche e risposta sismica

Le principali caratteristiche meccaniche di un paramento murario sono:

- La disomogeneità, dovuta al fatto che pietre/mattoni e malta hanno a loro volta proprietà meccaniche fortemente diverse tra loro;
- L'anisotropia, legata alla forma e alle proporzioni degli elementi e alle modalità con cui vengono disposti oltre che alla presenza eventuali di fori e alla loro direzione. Questo attributo fa sì che la resistenza dipenda dalla direzione dei carichi applicati;

- L'asimmetria, si riferisce al diverso comportamento che si ha per la trazione e la compressione;
- La non linearità del legame sforzi-deformazioni, conseguenza diretta delle caratteristiche sopra elencate.

La resistenza della muratura è funzione della resistenza dei suoi elementi costituenti: il valore di riferimento è quello della compressione, essendo per entrambi la resistenza a trazione molto ridotta. Il mattone ha, però, modulo elastico e resistenza maggiori rispetto alla malta e quindi presenta rottura fragile, mentre quest'ultima presenta una fase di rottura caratterizzata da grandi deformazioni.

Il grafico che segue mostra qualitativamente il comportamento della malta e del laterizio alla prova mono-assiale di trazione-compressione.

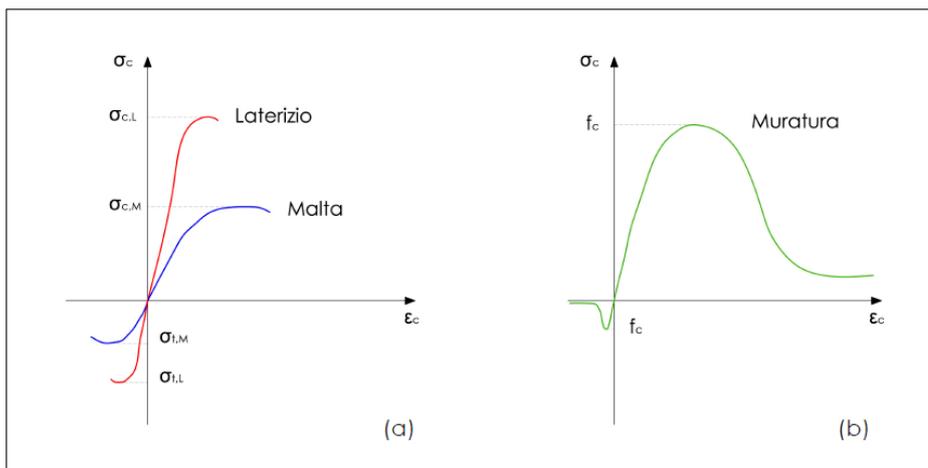


Figura 3.45 - (a) comportamento di malta e laterizio; (b) comportamento della muratura

Nonostante la muratura abbia un'ottima capacità di contrastare le azioni verticali, derivanti dal peso proprio e da ulteriori carichi verticali, non è altrettanto per quelle orizzontali.

L'entità delle forze di inerzia che insorgono in una struttura per effetto di una azione sismica è funzione anche del suo periodo di oscillazione: gli edifici in muratura risultano essere, per loro natura, molto rigidi, sia per le caratteristiche proprie dei suoi elementi sia perché hanno in genere una modesta altezza. Alla elevata rigidità si associa, però, un basso periodo di oscillazione, a cui consegue una grande amplificazione dell'azione sismica. Al seguito dei movimenti tellurici, infatti, si formano fessure e plasticizzazioni che

minano la rigidità del sistema e fanno sì che la costruzione assuma un periodo di oscillazione maggiore, che porta a una riduzione dell'amplificazione dell'azione sismica e a una dissipazione di energia che smorza gli effetti del terremoto.

Inoltre, considerando una parete muraria isolata, si ha che questa abbia una buona capacità di far fronte ad azioni orizzontali purché agenti nel proprio piano, in modo che possa adempiere anche al ruolo di controvento. Diversamente accade in una parete in cui le azioni orizzontali siano dirette ortogonalmente al suo piano: a queste la risposta è debole.

Per il corretto funzionamento di una struttura in muratura sottoposta a sisma, i suoi elementi (muri portanti, muri controvento e solai) devono essere ben collegati tra loro per escludere i possibili meccanismi di crisi fuori piano. Il comportamento scatolare ha quindi il cruciale vantaggio di permettere alle varie componenti di cooperare per resistere ai carichi applicati e di garantire la giusta stabilità e rigidità all'insieme.

Mentre gli edifici moderni possono essere schematizzati da un telaio le cui entità verticali e orizzontali, pilastri e travi, sono perfettamente collegate tra loro, le costruzioni in muratura sono manchevoli di questa continuità strutturale. L'assenza di giunti favorisce il verificarsi di collassi parziali: durante un terremoto un fabbricato così realizzato non ha un comportamento solidale d'insieme, ma tende a suddividersi in porzioni di muratura che, per dimensioni e forma, reagiscono autonomamente alle azioni. Un'ipotesi imprescindibile alla base della teoria della discretizzazione dell'edificio in macroelementi è quella di poter valutare queste parti come monolitiche e ciò implica che la muratura che li compone sia di buona qualità. La risposta al sisma di un manufatto in muratura è quindi quella offerta dai suoi macroelementi: lo studio del loro comportamento in azione definisce tutti i possibili meccanismi di danno attivabili.

Il livello di qualità di una muratura si può valutare sulla rispondenza o meno alla "regola dell'arte", che esprime l'insieme delle indicazioni empiriche che governano l'esecuzione di determinate lavorazioni, in genere artigianali, che il progettista seguiva nelle opere di costruzione.

Un paramento è stato realizzato a regola d'arte se presenta le seguenti proprietà:

- Presenza di giunti verticali sfalsati: questo requisito influisce notevolmente sulla diffusione dei carichi verticali concentrati nella parete e garantisce un appoggio regolare tra i conci;

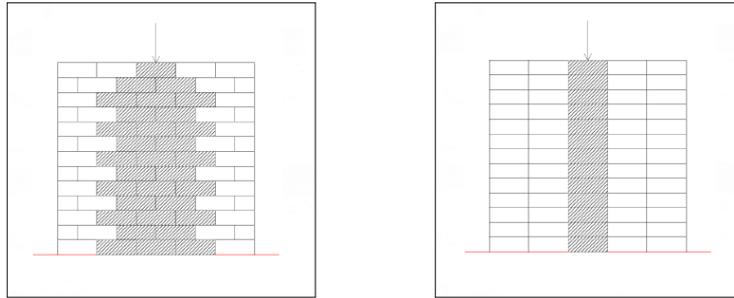


Figura 3.46 – A sinistra: trasmissione dei carichi con giunti sfalsati, a destra: giunti non sfalsati

- Presenza di diatoni: blocchi tessuti ortogonalmente al piano del pannello murario, che garantiscono non solo la monoliticità trasversale della parete ma anche l’ammortamento dell’intero sistema;
- Presenza di filari orizzontali: costituisce un appoggio regolare tra gli elementi e una buona distribuzione dei carichi verticali, oltre che favorire la formazione di cerniere cilindriche orizzontali;
- Caratteristiche meccaniche dei blocchi: valutare queste proprietà è fondamentale per una adeguata risposta dell’elemento in condizioni sia statiche sia dinamiche;
- Qualità della malta: il suo ruolo è cruciale nel caso in cui ricopra la funzione di coesione e non di allettamento, tuttavia anche una malta di scarso pregio aiuta a regolarizzare le superfici di contatto e a uniformare e distribuire i carichi; si osserva inoltre che una elevata quantità può essere deleteria.

Anche se questo approccio non è scientificamente rigoroso, riconoscere in un’opera la conformità alla regola dell’arte è un primo elemento di valutazione della sicurezza.

Qualora venissero a mancare queste proprietà nell’apparecchio murario e prima ancora di procedere con l’analisi strutturale è opportuno intervenire per ristabilire la monoliticità del comparto oggetto di studio.

Una volta individuati i macroelementi si può procedere alla definizione dei meccanismi di danno, classificati come segue:

- i. Meccanismi di primo modo (meccanismi fuori dal piano): prevedono il ribaltamento del muro fuori dal piano come conseguenza alla componente dell’azione sismica orizzontale alla parete. Questo modo dipende da problemi di equilibrio fortemente influenzati dalle condizioni al contorno (ad es. l’ammortamento tra le pareti e la presenza di elementi spingenti): se mancano

dispositivi efficaci di trattenimento in sommità e a livello interpiano (catene e cordoli) la parete muraria non è in grado, se non attraverso il peso proprio, di resistere al ribaltamento

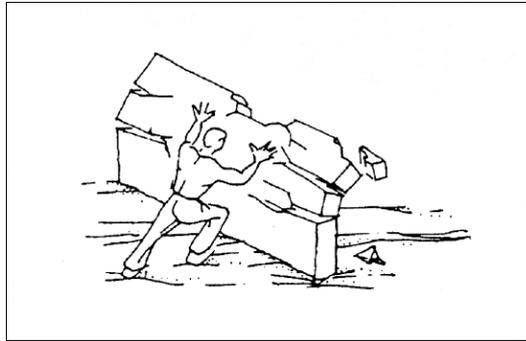


Figura 3.47 - Simulazione di forze che agiscono ortogonalmente al piano della parete (da Touliatos, 1996)

- ii. Meccanismi di secondo modo (meccanismi nel piano): riguardano la risposta delle pareti nel proprio piano a forze sismiche che agiscono parallelamente al piano della parete; in questo caso le alterazioni saranno per taglio e flessione

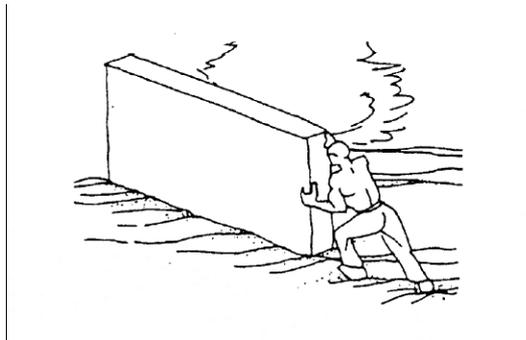


Figura 3.48 - Simulazione di forze che agiscono nel piano della parete (da Touliatos, 1996)

La correttezza e l'adeguatezza delle connessioni è il fulcro per una buona risposta sismica: importanti sono i giunti tra le pareti verticali ma ancora più indispensabili sono i collegamenti tra queste e gli orizzontamenti di piano e di copertura, i quali conferiscono al volume un comportamento scatolare.

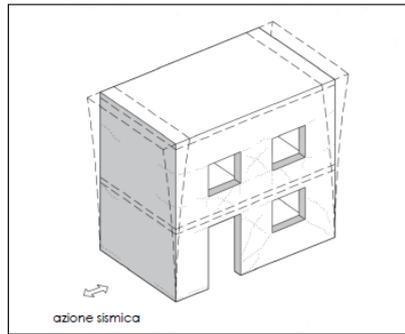


Figura 3.49 - Comportamento scatolare di un edificio in muratura sottoposto all'azione sismica (Vallucci, Quagliarini, & Lenci, 2013)

Un'ulteriore aspetto da non trascurare è la rigidità dell'orizzontamento stesso, il quale ricopre un ruolo altrettanto significativo nell'analisi delle forze sismiche.

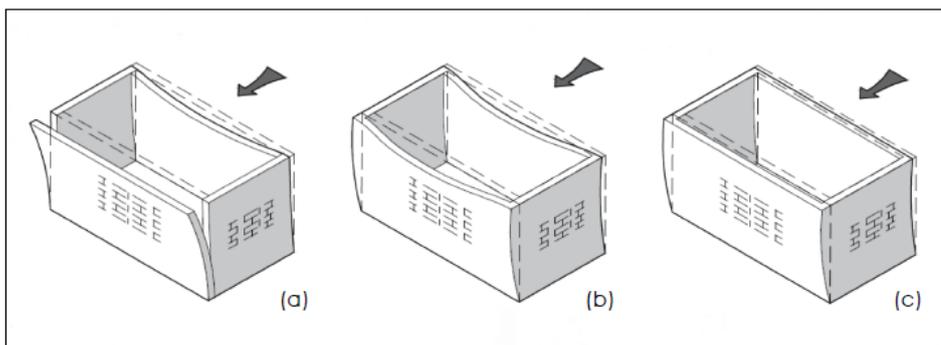


Figura 3.50 – Come la rigidità dell'orizzontamento influenza la risposta all'azione sismica: (a) solaio deformabile in assenza di cordolo; (b) solaio deformabile e cordolo di piano; (c) solaio rigido e cordolo di piano (Vallucci, Quagliarini, & Lenci, 2013)

3.4.2 Le strutture a torre

Torri e campanili costituiscono gran parte del patrimonio storico e architettonico in Italia: la conformazione geometrica, il notevole peso proprio indotto dalla muratura e la mancanza di una rigorosa manutenzione programmata espongono da sempre le torri campanarie di fattura tradizionale a un elevato rischio sismico. (Mondello, 2013).

Infatti, queste costruzioni hanno una preponderante vulnerabilità sismica dovuta al loro significativo sviluppo verticale, che comporta una elevata posizione del baricentro e stati di sollecitazione altrettanto notevoli (Di Tommaso & Casacci, 2013).

Generalmente i campanili possono essere suddivisi in macroelementi che, a partire dal basso verso l'alto, sono: fondazione, basamento, fusto (o tronco), cella campanaria, cuspidi e pinnacoli. Vi sono poi altri elementi che possono avere impatto sulle caratteristiche deformative della struttura: il telaio di sostegno delle campane, che, quando in azione, agiscono con forze sollecitanti, elementi orizzontali, quali volte o solai lignei, e scale in muratura o in legno.

Il comportamento sismico dipende da fattori specifici: la snellezza, il grado di ammorsamento delle pareti, l'eventuale presenza di strutture in adiacenza, l'aggiunta in sommità di elementi architettonici sottili o di elementi vulnerabili (celle campanarie) e danneggiamenti, dovuti ad esempio alle vibrazioni indotte dalle campane o da problematiche in fondazione.

La snellezza è un parametro molto variabile: esistono torri molto tozze per i grandi spessori murari che le contraddistinguono, dovuti a tecniche a sacco, e campanili molto snelli.

L'ammorsamento tra le pareti garantisce un funzionamento a mensola incastrata alla base con una rigidità data dall'intera sezione muraria e non come un insieme di parti scollegate tra loro.

Torri e campanili sono messi in opera secondo morfologie e tecnologie diverse, ma, per semplificarne lo studio, la torre campanaria viene definita come un unico macroelemento con tre possibili aspetti:

- Campanile isolato;
- Campanile addossato;
- Campanile sovrapposto all'edificio di culto.

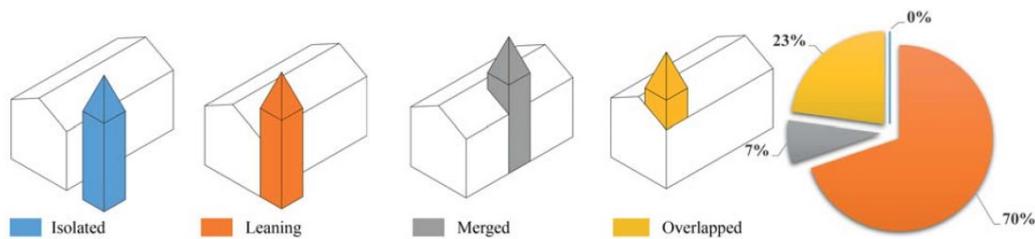


Figura 3.51 - (Mondello, 2013)

Questa prima distinzione è significativa in quanto la presenza di volumi a contatto modifica le frequenze proprie di vibrazione della struttura che, risultando irrigidita se addossata, vede incrementare la domanda sismica.

Per conseguire un buon funzionamento strutturale, gli interventi tradizionali da eseguire sono: tessitura dei cantonali, inserimento di cerchiature, catene metalliche e collegamento tra orizzontamenti.

Inoltre, deve essere valutata anche la presenza di spinte, nel caso di volte in muratura, e il contatto con altre strutture di minore altezza e a diverse quote, che rappresentano dei vincoli orizzontali che possono modificarne il comportamento globale, costituendo dei punti di irrigidimento localizzati e punti di possibile concentrazione degli sforzi. Quest'ultimo è il caso ad esempio di campanili inglobati nelle chiese o torri inglobate nella cinta muraria.

Nei campanili, la cella campanaria può risultare un elemento vulnerabile poiché sono presenti ampie bucaure, che producono dei pilastrini snelli e poco carichi con rotture a taglio per scorrimento. Lo stesso vale per elementi snelli e svettanti in sommità, la cui vulnerabilità è principalmente dovuta al modesto carico verticale, dato dal solo peso proprio, che garantisce un limitato effetto stabilizzante nel ribaltamento.

Altro elemento critico da considerare è l'effetto di amplificazione del moto sismico che si verifica nelle parti più alte della costruzione: l'osservazione dei danni di celle campanarie simili, ha mostrato come esse si siano comportate in modo molto diverso, a parità di azione sismica alla base del campanile, a causa della diversa interazione tra sisma, terreno di fondazione, struttura e sovrastruttura.

Ipotizzando di analizzare una torre isolata, come il caso della Torre del Borgo, si possono individuare sei situazioni principali di danno facendo specificatamente riferimento ai cinematici:

- Rotazione verso l'esterno della parte superiore (del tronco) della torre campanaria dovuta ad azioni al di fuori del piano, con formazione di cerniera cilindrica ad asse orizzontale o di cerniera sferica in corrispondenza di un punto o di uno spigolo (*meccanismi 1a e 1b*);
- Traslazione della parete superiore (del tronco) della torre campanaria, seguita da una rotazione della stessa (*meccanismi 2a e 2b*);
- Rotazione verso l'esterno di una angolata attorno a un punto di cerniera formatosi sulla stessa (*meccanismo 3*);
- Rotazione verso l'esterno di una o più angolate con asse di rotazione orizzontale parallelo al lato o alla diagonale (*meccanismo 4*);
- Rotazione della parte superiore (del tronco) della torre, risultante dalla combinazione di una rotazione intorno a un asse verticale e di una attorno a un asse orizzontale (*meccanismo 5*);
- Traslazione della parte superiore della torre (*meccanismo 6*).

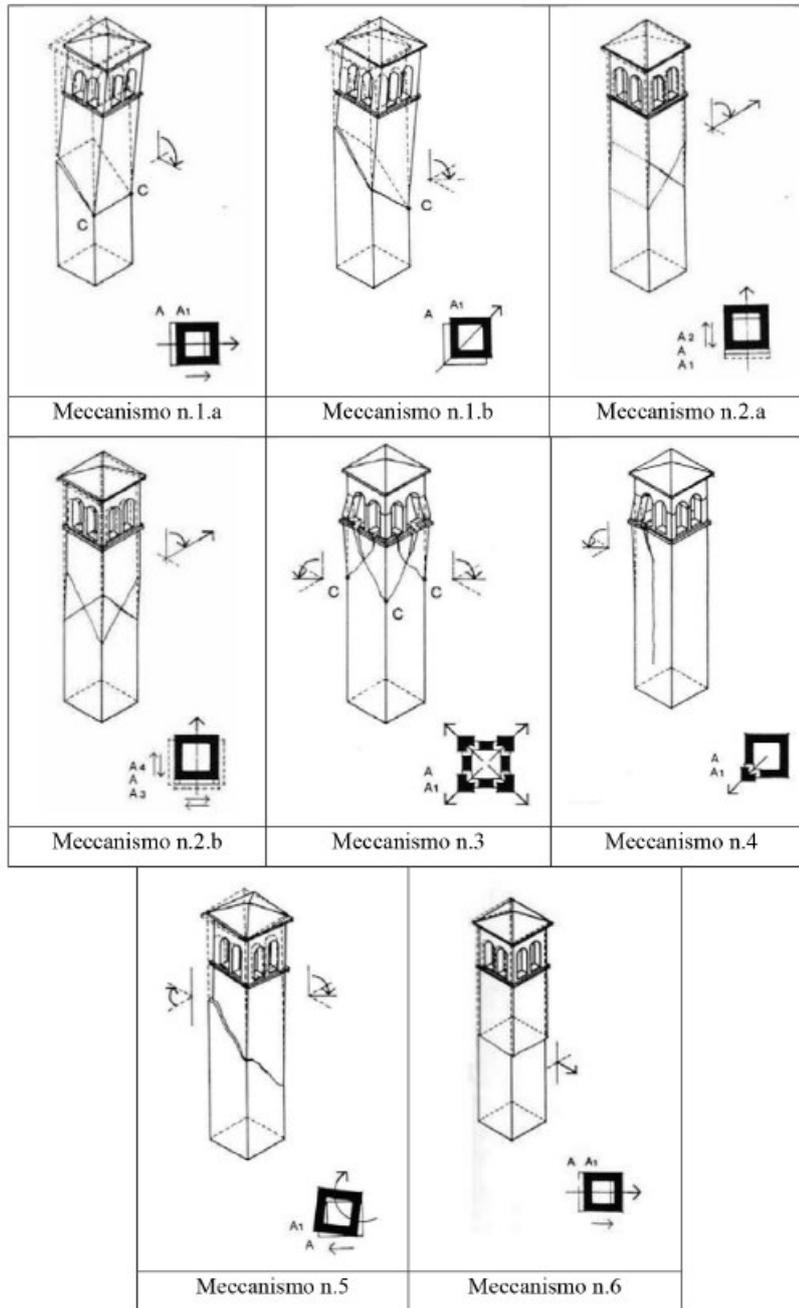


Figura 3.52 - Situazioni principali di danno per campanili isolati (Doglioni, Moretti, & Petrini, 1994) (Di Tommaso & Casacci, 2013)

Ne risulta che forma, tecnologia costruttiva, materiale utilizzato, caratteristiche del terreno sottostante e struttura di fondazione influenzano i meccanismi tipici di collasso sismico.

4 Rilievo e trattamento dei dati

Il rilievo architettonico è un'operazione volta a capire l'opera nella sua globalità: rilevare significa innanzitutto comprendere l'opera che si ha davanti, coglierne tutti i valori, da quelli dimensionali a quelli costruttivi, da quelli formali a quelli culturali (Docci & Maestri, Manuale di rilevamento architettonico e urbano, 2009).

Per il rilievo della torre campanaria in Piazza Giacomo Leopardi a Recanati si è scelto di adoperare la tecnica del laser scanner: nel contesto delle strutture storiche un'indagine accurata è indispensabile per superare ogni incertezza sulla geometria, le proprietà dei materiali e la tecnica di costruzione, risultando così uno strumento eccellente per il monitoraggio e il restauro. (Ercan & Çakti, 2017).

Il patrimonio architettonico, infatti, richiede una valutazione periodica del suo stato di conservazione per poter pianificare i possibili interventi futuri, soprattutto nel caso di eventi sismici. Mentre i metodi tradizionali sono limitati nel descrivere lo stato corrente della struttura poiché coinvolgono quasi sempre misure di specifici punti, l'uso del laser scanner non solo permette di acquisire dati a debita distanza dal caso studio e in sicurezza, qualora si verificasse una crisi sismica, ma sono anche in grado di riportare rapidamente tutte le informazioni necessarie a un vero e proprio monitoraggio. Il tutto in tempi brevi e in sicurezza (Quagliarini, Clini, & Ripanti, 2017).

4.1 Il rilievo della Torre del Borgo

Il laser scanner 3D acquisisce autonomamente e indistintamente i punti nello spazio, per questo è indispensabile una accurata fase di progettazione della campagna di rilievo. In primis si deve padroneggiare una buona conoscenza dell'oggetto da misurare, così da poter scegliere adeguatamente la tipologia di laser scanner da utilizzare e la strategia di acquisizione. Nella quasi totalità dei casi è opportuno effettuare più scansioni per ottenere dati esaustivi dell'area.

Nonostante ogni campagna di rilievo presenti degli aspetti itineranti, è possibile definire delle linee guida generali per la fase operativa di scansione:

- Riduzione delle zone d'ombra e occlusioni;
- Buon angolo di acquisizione: è preferibile scegliere viste frontali dell'oggetto e angoli di incidenza (angolo piano formato dal raggio stesso con la normale alla superficie) non troppo elevati;
- Buona sovrapposizione tra le scansioni, che facilitano la successiva fase di allineamento;
- Risoluzione omogenea delle scansioni, in quanto devono essere poi unite;
- Visibilità dei target, utili per la georeferenziazione delle scansioni e la loro unione (Nespeca, 2018).

Nel caso in cui si decida di aggiungere immagini ad alta definizione per "mappare" la nuvola è buona norma:

- Buona qualità delle immagini;
- Medesima lunghezza focale per tutte le foto acquisite;
- Posizione di presa della foto nadirale (verticale) e non inclinata;
- Punto di vista della fotocamera vicino e il più possibile coincidente al punto di presa del laser scanner
- Visibilità dei target.

Una volta individuati i punti di presa che garantiscano i criteri sopra elencati, si posiziona lo strumento e si imposta la densità dei punti da rilevare, sia in orizzontale sia in verticale, prima di procedere operativamente. Più punti vengono acquisiti, maggiore sarà la risoluzione della nuvola e la qualità della rappresentazione e più lungo sarà il tempo per

la misura e la successiva elaborazione dei dati. Scegliendo un buon compromesso tra accuratezza del dato e tempistiche, un laser scanner può impiegare circa 10 minuti per ogni presa. Il vantaggio delle ultime tecnologie è quello di vedere in tempo reale, su un dispositivo decentrato ad es. un tablet, la scansione in modo da poter valutare se i dati sono stati registrati correttamente e garantirne un ottimale utilizzo.

Terminata la fase in sito, segue quella di allineamento delle nuvole, che può avvenire tramite *target* oppure utilizzando *features*: i *target* (sfere, immagini in bianco e nero o catarifrangenti) vengono posizionati su appositi oggetti, su aste o treppiedi mentre i *features* sono punti di riferimento riconoscibili, ad es. spigoli o significative variazioni cromatiche su superfici geometricamente uniformi, ed è l'operatore a individuarli naturalmente (Nespeca, 2018). Il vantaggio di questi elementi si riscontra soprattutto quando la campagna di rilievo prevede più giorni: la loro presenza permette di eseguire con continuità il lavoro.

Una valida alternativa potrebbe essere quella di portare l'intero modello, ottenuto con l'allineamento automatico delle stazioni, da un sistema di riferimento locale a uno georeferenziato, qualora la sovrapposizione delle scansioni sia adeguata e si possa procedere senza l'utilizzo di *target*.

La campagna di rilievo della Torre del Borgo si è svolta in due giornate: nella prima sono state rilevate 20 stazioni con l'ausilio di *target* e con il laser scanner Scan Station LEICA P40; nella seconda lo strumento utilizzato è il Leica RTC360 e le stazioni sono state 23, non sono stati utilizzati riferimenti esterni in quanto preliminarmente si è deciso di adottare delle sovrapposizioni dal momento che la presenza di piccoli passaggi di collegamento verticale e orizzontale richiedeva scansioni a parte.

4.1.1 Il laser scanner Scan Station LEICA P40

Il laser scanner *Scan Station P40 Leica* è un sistema *all in one* ad altissima velocità, compatto e a impulsi, che comprende scanner, batterie, sistema di controllo, memorizzazione dati, fotocamera/videocamera con auto-esposizione, compensatore biassiale, precisione per il rilievo delle pendenze, piombo laser, lunga portata e campo visivo completo.

Il campo di ripresa è *full dome*, cioè 360°x290°, il raggio di scansione raggiunge i 270 metri, la velocità è di 1 milione di punti al secondo perchè la configurazione *Smart X-MirrorTm*, consente agli specchi di ruotare in pochi secondi: è possibile effettuare acquisizioni in meno di due minuti. Tutte queste caratteristiche costituiscono degli ottimi presupposti per nuvole di punti a colori, ricche di dettagli e mappate realisticamente.

L'interfaccia grafica *on board* del laser è intuitiva e presenta un *display touchscreen* a colori; i dati registrati vengono poi immagazzinati all'interno di un *hard disk* da 256 GB incorporato nello strumento, i quali posso essere trasferiti su un computer tramite *USB* o *ethernet*. Sul dispositivo è anche installata una fotocamera digitale a colori integrata con zoom per riprese video, che permette di catturare immagini panoramiche *HD* da 700 megapixel.

Le scansioni possono essere elaborate con la piattaforma associata allo strumento, quale il software *Leica Cyclone* e dai *plug-in Leica CloudWorx* per i sistemi *CAD*.

Di seguito tutte le caratteristiche del laser scanner *Scan Station P40 Leica*.

System Accuracy			
Accuracy of single measurement *			
Range accuracy	1.2 mm + 10ppm over full range		
Angular accuracy	8" horizontal; 8" vertical		
3D position accuracy	3 mm at 50m; 6mm at 100m		
Target acquisition **	2 mm standard deviation at 50m		
Dual-axis compensator	Liquid sensor with real-time onboard compensation, selectable on/off, resolution 1", dynamic range ±5', accuracy 1.5"		
Distance Measurement System			
Type	Ultra-high speed time-of-flight enhanced by Waveform Digitising (WFD) technology		
Wavelength	1550 nm (invisible) / 658 nm (visible)		
Laser class	1 (in accordance with IEC 60825:2014)		
Beam divergence	< 0.23 mrad (FWHM, full angle)		
Beam diameter at front window	≤ 3.5 mm (FWHM)		
Range and reflectivity	Minimum range 0.4 m		
	Maximum range at reflectivity		
	120m	180m	270m
P30	18%	-	-
P40	8%	18%	34%

Scan rate	Up to 1'000'000 points per second
Range noise *	0.4 mm rms at 10m 0.5 mm rms at 50m
Field-of-View Horizontal Vertical	360° 290°
Data storage capacity	256 GB internal solid-state drive (SSD) or external USB device
Communications/ Data transfer	Gigabit Ethernet, integrated Wireless LAN or USB 2.0 device
Onboard display	Touchscreen control with stylus, full colour VGA graphic display (640×480 pixels)
Laser plummet	Laser class 1 (IEC 60825:2014) Centring accuracy: 1.5 mm at 1.5 m Laser dot diameter: 2.5 mm at 1.5 m Selectable ON/OFF

Imaging System	
Internal camera	
Resolution	4 megapixels per each 17°×17° colour image; 700 megapixels for panoramic image
Pixel size	2.2 µm
Video	Streaming video with zoom; auto-adjusts to ambient lighting
White balancing	Sunny, cloudy, warm light, cold light, custom
HDR	Tonemapped / full range
External camera	Canon EOS 60D/70D/80D supported

Power	
Power supply	24 V DC, 100 – 240 V AC
Battery type	2× Internal: Li-Ion; External: Li-Ion (connect via external port, simultaneous use, hot swappable)
Duration	Internal > 5.5 h (2 batteries) External > 7.5 h (room temp.)

Environmental	
Operating temperature	-20°C to +50°C / -4°F to 122°F
Storage temperature	-40°C to +70°C / -40°F to 158°F
Humidity	95 %, non-condensing
Dust/Water	Solid particle/liquid ingress protection IP54 (IEC 60529)

Physical	
Scanner	
Dimensions (D×W×H)	238 mm × 358 mm × 395 mm / 9.4" × 14.1" × 15.6"
Weight	12.25 kg / 27.0 lbs, nominal (w/o batteries)
Battery (internal)	
Dimensions (D×W×H)	40 mm × 72 mm × 77 mm / 1.6" × 2.8" × 3.0"
Weight	0.4 kg / 0.9 lbs
Mounting	Upright or inverted

Control Options	
Full colour touchscreen for onboard scan control.	
Remote control: Leica CS10/CS15/CS20/CS35 controller or any other remote desktop capable device, including iPad, iPhone and other SmartPhones; external simulator.	

Functionality	
Survey workflows and onboard registration	Quick orientation, Set azimuth, Known backsight, Resection (4 and 6 parameters), Traverse
Check & Adjust	Field procedure for checking of angular parameters, tilt compensator and range offset
Onboard target acquisition	Target selection from video or scan
Onboard user interface	Switchable from standard to advanced
One button scan control	Scanner operation with one button concept
Scan area definition	Scan area selection from video or scan; batch job scanning

4.1.2 Il laser scanner Leica RTC360 3D

La soluzione *Leica RTC360* combina in modo efficiente: lo scanner ad alte prestazioni, l'applicazione per la registrazione automatica delle scansioni in tempo reale sul tablet e il *software* performante al fine di integrare il modello 3D nel *workflow*.

Le acquisizioni 3D sono velocissime: grazie alla misura di 2 milioni punti al secondo e all'avanzato sistema di *imaging HDR (High Dynamic Range)*, la creazione di nuvole di punti 3D può essere completata in meno di 2 minuti, con un risultato eccellente in qualsiasi condizione di illuminazione.

Il campo di ripresa è *full dome*, cioè 360°x300°, e la fotocamera integrata ha una risoluzione di 432 *megapixel* per immagini panoramiche, che archivia in formato *raw*.

Registra automaticamente i movimenti da una stazione all'altra senza intervento manuale grazie al sistema *VIS Visual Inertial System*; inoltre, in sito, è possibile esaminare automaticamente i dati di scansione e le immagini.

Piccolo e leggero, il suo *design* è perfetto per essere posizionato ovunque: nel rilievo della Torre del Borgo è stato appoggiato al di sopra dell'ultimo orizzontamento per poter rilevare a tutto tondo i merli, infatti, nonostante l'insolita collocazione, pigiando un solo pulsante la scansione si è avviata immediatamente.

L'App *Leica Cyclone FIELD 360* collega i dati appena acquisiti e la registrazione degli stessi in remoto con il *Cyclone REGISTER 360*.

Di seguito tutte le caratteristiche del laser scanner *Leica RTC360*.

GENERAL	
3D laser scanner	High-speed 3D laser scanner with integrated HDR spherical imaging system and Visual Inertial System (VIS) for real time registration
PERFORMANCE	
Data acquisition	< 2 mins for complete full dome scan and spherical HDR image at 6mm @ 10 m resolution
Real time registration	Automatic point cloud alignment based on real time tracking of scanner movement between setups based on Visual Inertial System (VIS) by video-enhanced inertial measurement unit
Double scan	Automatic removal of moving objects
SCANNING	
Distance measurement	High-speed, high dynamic time of flight enhanced by Waveform Digitising (WFD) technology
Laser class	1 (in accordance with IEC 60825-1:2014), 1550 nm (invisible)
Field of view	360° (horizontal) / 300° (vertical)
Range	Min. 0.5 - up to 130 m

Speed	Up to 2,000,000 pts / sec
Resolution	3 user selectable settings (3/6/12 mm @ 10 m)
Accuracy*	Angular accuracy 18" Range accuracy 1.0 mm + 10 ppm 3D point accuracy 1.9 mm @ 10 m 2.9 mm @ 20 m 5.3 mm @ 40 m
Range noise**	0.4 mm @ 10 m, 0.5 mm @ 20 m

OPERATION

On scanner	Touch-screen control with finger touch, full colour WVGA graphic display 480 x 800 pixels
Mobile devices	Leica Cyclone FIELD 360 app for iPad or Android tablets including: - Remote control of scan functions - 2D & 3D data viewing - Tagging - Automatic alignment of scans
Wireless	Integrated wireless LAN (802.11 b/g/n)
Data storage	Leica MS256, 256 GB exchangeable USB 3.0 flash drive

DESIGN & PHYSICAL

Housing	Aluminium frame and sidecovers
Dimensions	120 mm x 240 mm x 230 mm / 4.7" x 9.4" x 9.1"
Weight	5.35 kg / 11.7 lbs, nominal (without batteries)
Mounting mechanism	Quick mounting on 5/8" stub on lightweight tripod / optional tribrach adapter / survey tribrach adapter available

POWER

Internal battery	2 x Leica GEB361 internal, rechargeable Li-Ion batteries. Duration: Typically up to 4 hours Weight: 340 g per battery
External	Leica GEV282 AC adapter

ENVIRONMENTAL

Operating temperature	-5° to +40°C
Storage temperature	-40° to +70°C
Dust/Humidity***	Solid particle/liquid ingress protection IP54 (IEC 60529)



Figura 4.1 – In alto e a seguire: target battuto in campagna e posizioni dello strumento RTC360 Leica



Figura 4.2 - Alcune delle fasi del rilievo del soppalco al livello 6 e della copertura al livello 7



Figura 4.3 - Il laser scanner Scan Station P40

4.1.3 Posizione delle stazioni di acquisizione

La progettazione vera e propria della campagna di rilievo è avvenuta in sito: una ricognizione della piazza e una valutazione di tutte le possibili angolazioni ha permesso di scegliere le posizioni più convenienti sulle quali disporre la strumentazione.

La morfologia della piazza e l'inserimento della torre nel contesto permettono di ottenere facilmente informazioni sui prospetti est e sud ai quali sono rivolte quattro scansioni, mentre i lati nord e ovest, essendo circondati da edifici, ne prevedono solo due.

Per allineare le scansioni interne con quelle esterne, è stato posizionato un target, *L-02*, in linea con l'ingresso, in modo tale da risultare un elemento in comune per le stazioni *S-003*, *S-004* e *S-007*, quest'ultima non è visibile nella mappa perché è al piano terra.

All'interno dello schema si possono distinguere diverse sigle: con la lettera *S* si fa riferimento alle scansioni effettuate con il laser scanner *Scan Station P40*, con la *J* si indicano quelle effettuate con il laser scanner *Leica RTC360* mentre le lettere *T* e *L* rappresentano i *target* usati come riferimento.

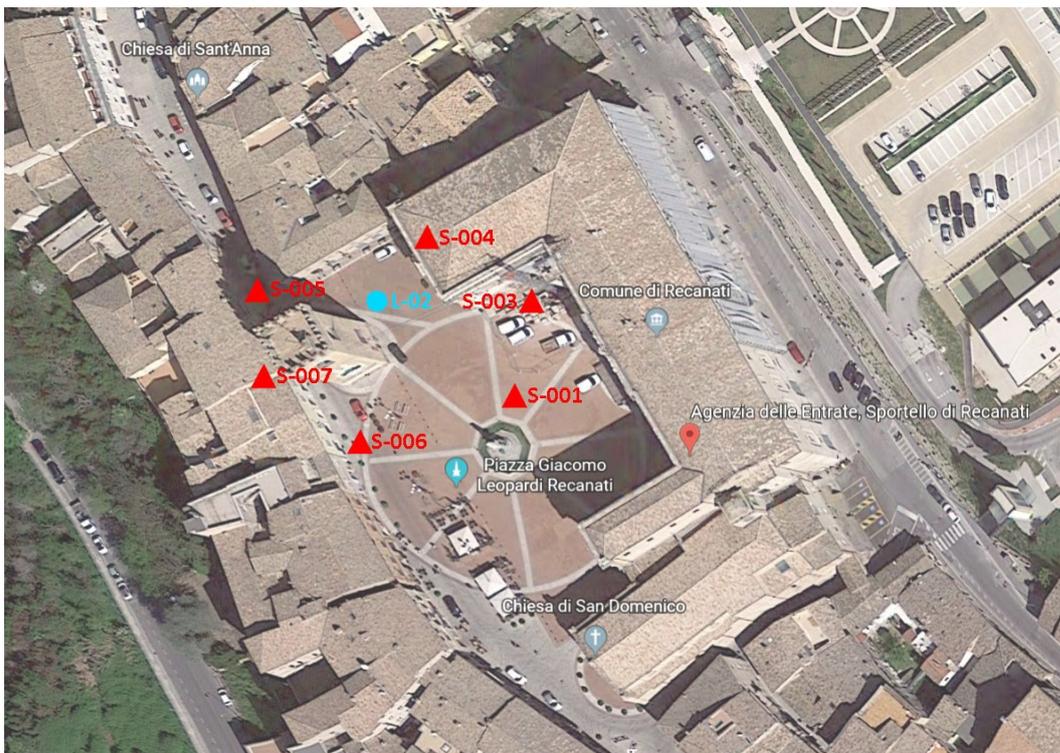


Figura 4.4 - Mappa delle stazioni esterne

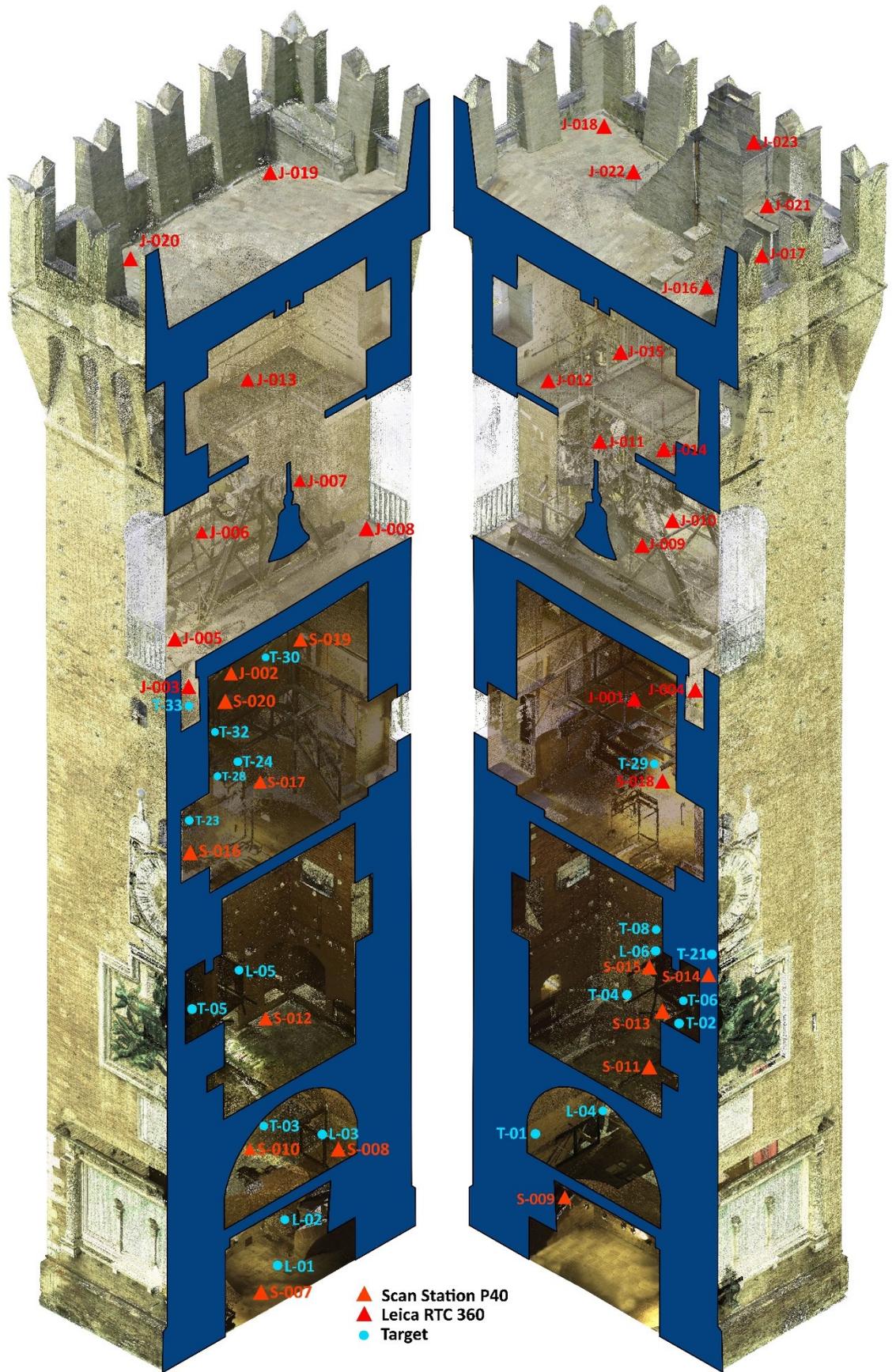


Figura 4.5 – Posizioni del laser scanner e dei target nella fase di rilievo

I dati relativi a ogni acquisizione sono riportati di seguito.

Stazione	N° di punti	Stazione	N° di punti
S01	9464654	J01	39170422
S02	14561164	J02	9868441
S03	13357724	J03	34232522
S04	12158910	J04	33533602
S05	13905236	J05	36120747
S06	11655208	J06	34783451
S07	28101903	J07	33538603
S08	14690240	J08	35622065
S09	14533332	J09	35415606
S10	14503947	J10	34797017
S11	14475980	J11	35141355
S12	14229540	J12	39131120
S13	14318663	J13	38711747
S14	14447024	J14	38746914
S15	14668001	J15	34477249
S16	14653702	J16	31421174
S17	14580719	J17	27377218
S18	14573522	J18	23713184
S19	14740312	J19	25318080
S20	14399680	J20	26714751
		J21	20837268
		J22	18134753
		J23	17370278

Figura 4.6 – A sinistra le scansioni effettuate il primo girone di rilievo con lo strumento Scan Station P40 (S), a destra quelle del secondo giorno con il laser scanner Leica RTC 360 (J)

4.1.4 Piante, prospetti e sezioni

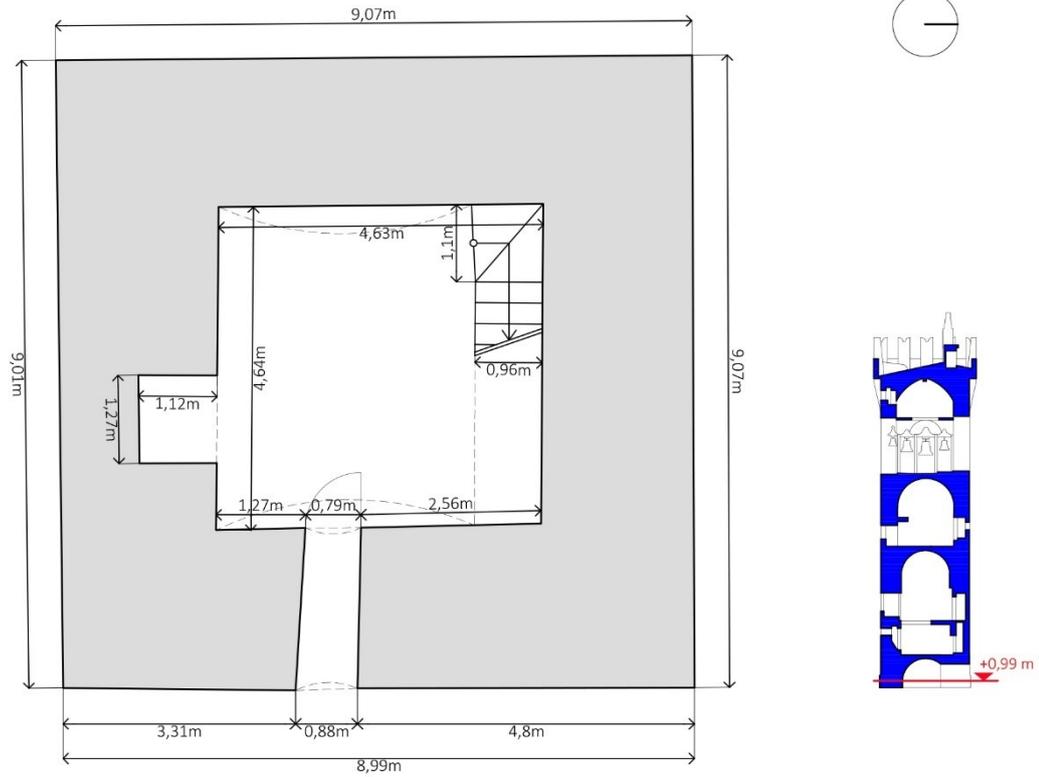


Figura 4.7 - Pianta quota +0,99 m scala 1:100

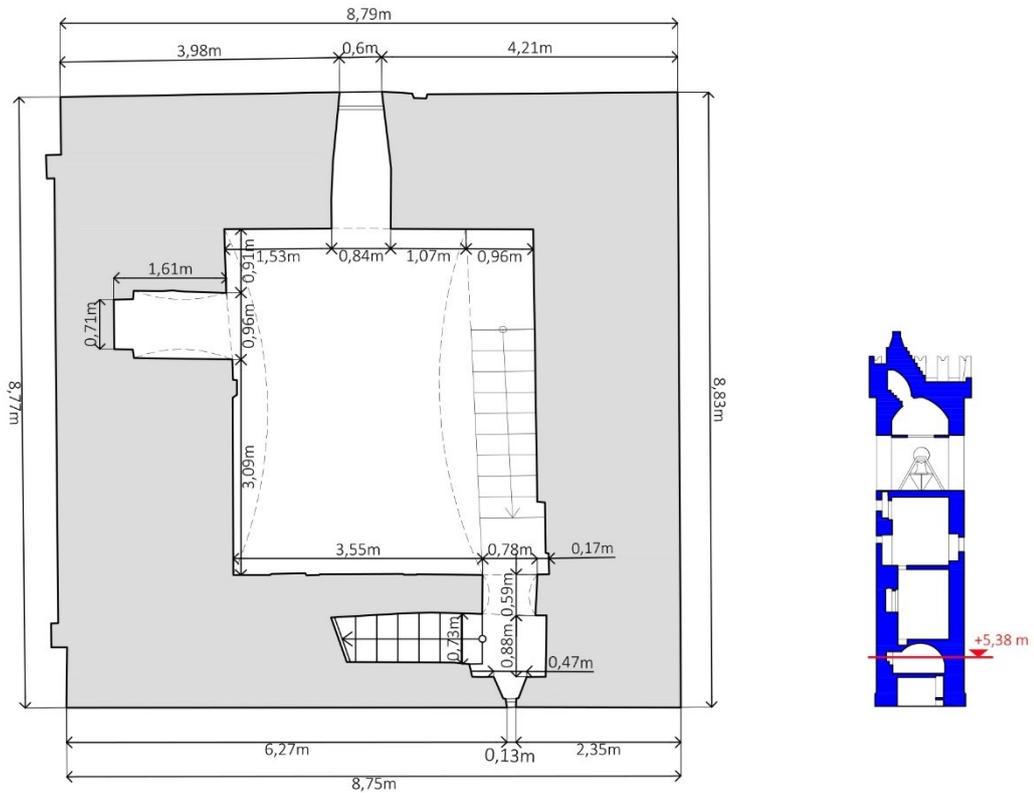


Figura 4.8 - Pianta quota +5,38 m scala 1:100

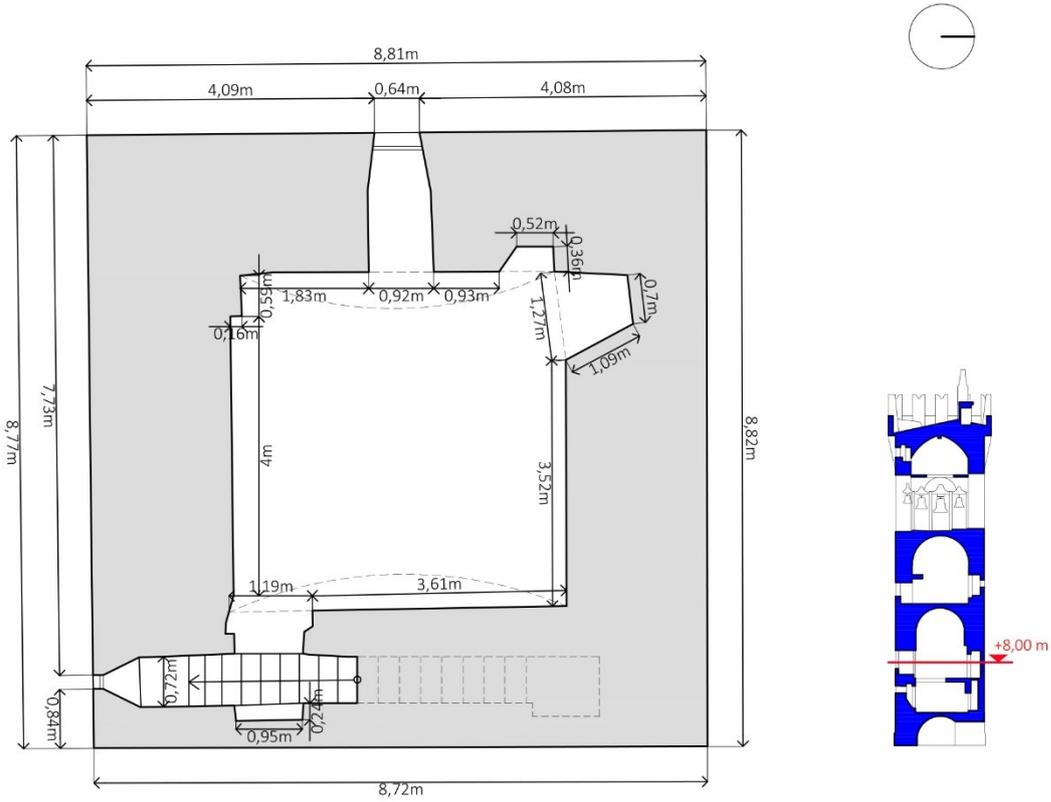


Figura 4.9 - Pianta quota +8,00 m scala 1:100

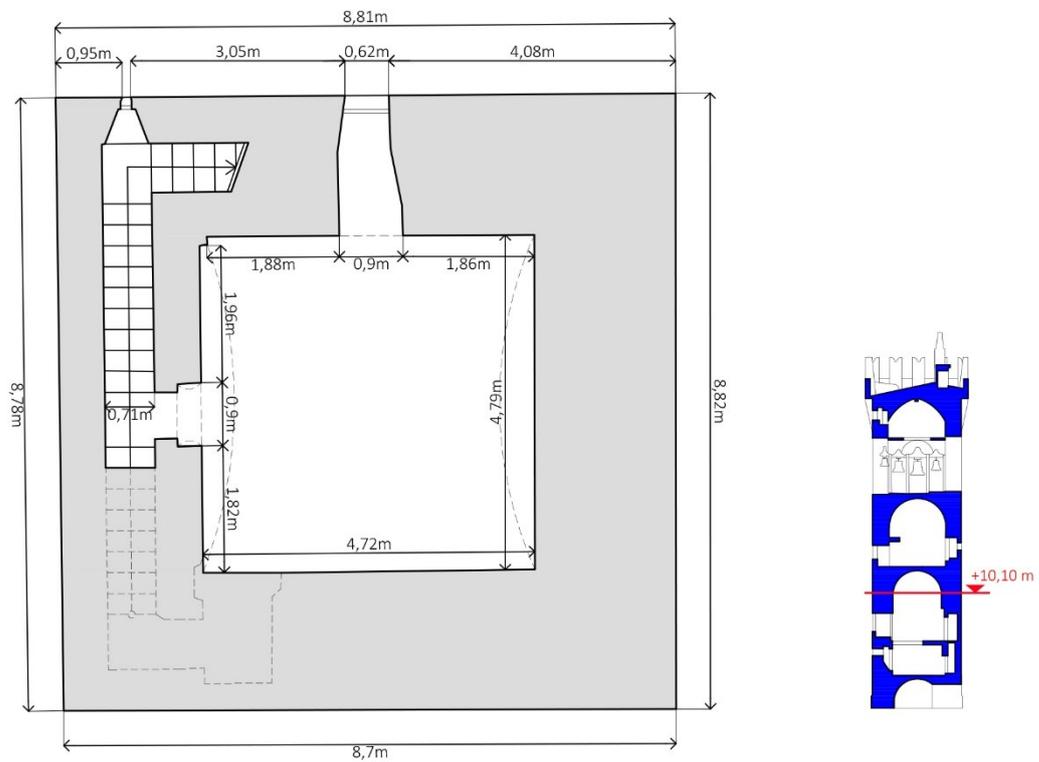


Figura 4.10 - Pianta quota +10,10 m scala 1:100

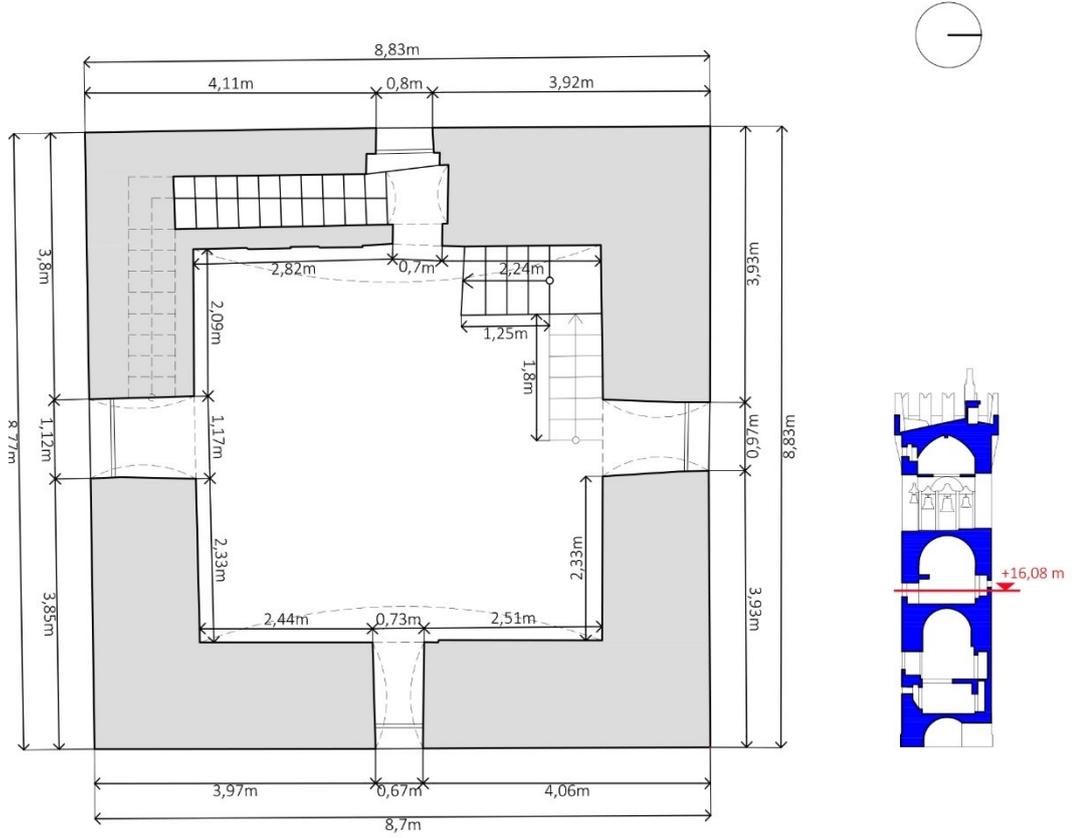


Figura 4.11 - Pianta quota +16,08 m scala 1:100

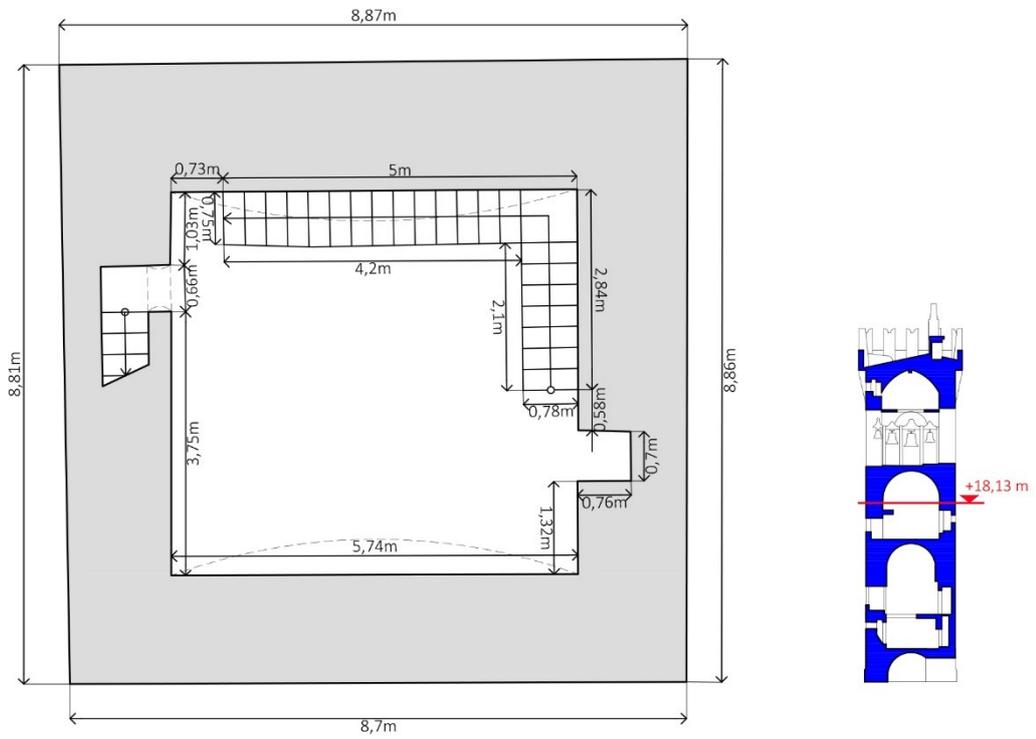


Figura 4.12 - Pianta quota +18,13 m scala 1:100

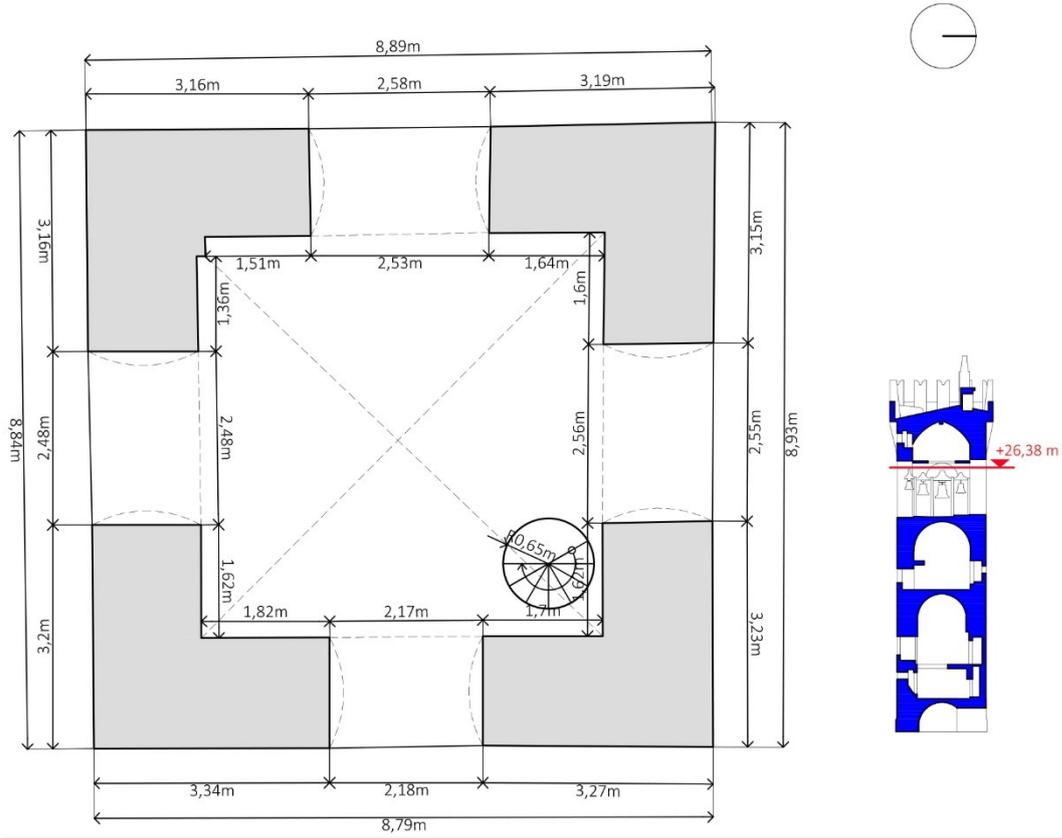


Figura 4.13 - Pianta quota +26,38 m scala 1:100

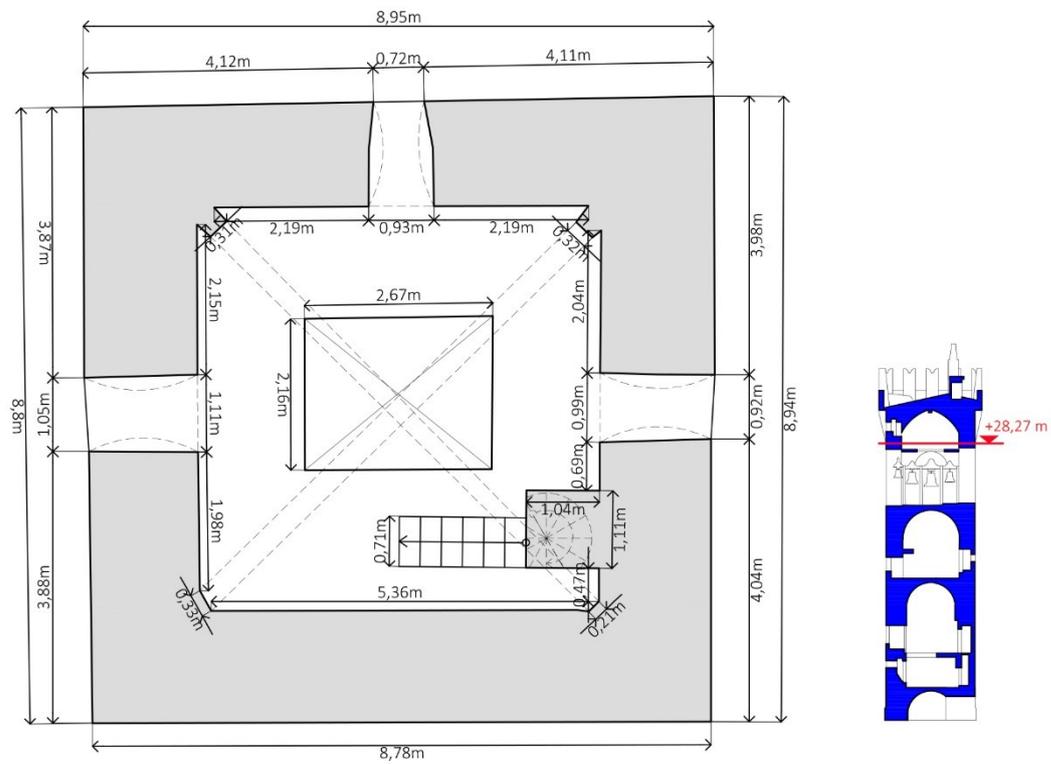


Figura 4.14 - Pianta quota +28,27 m scala 1:100

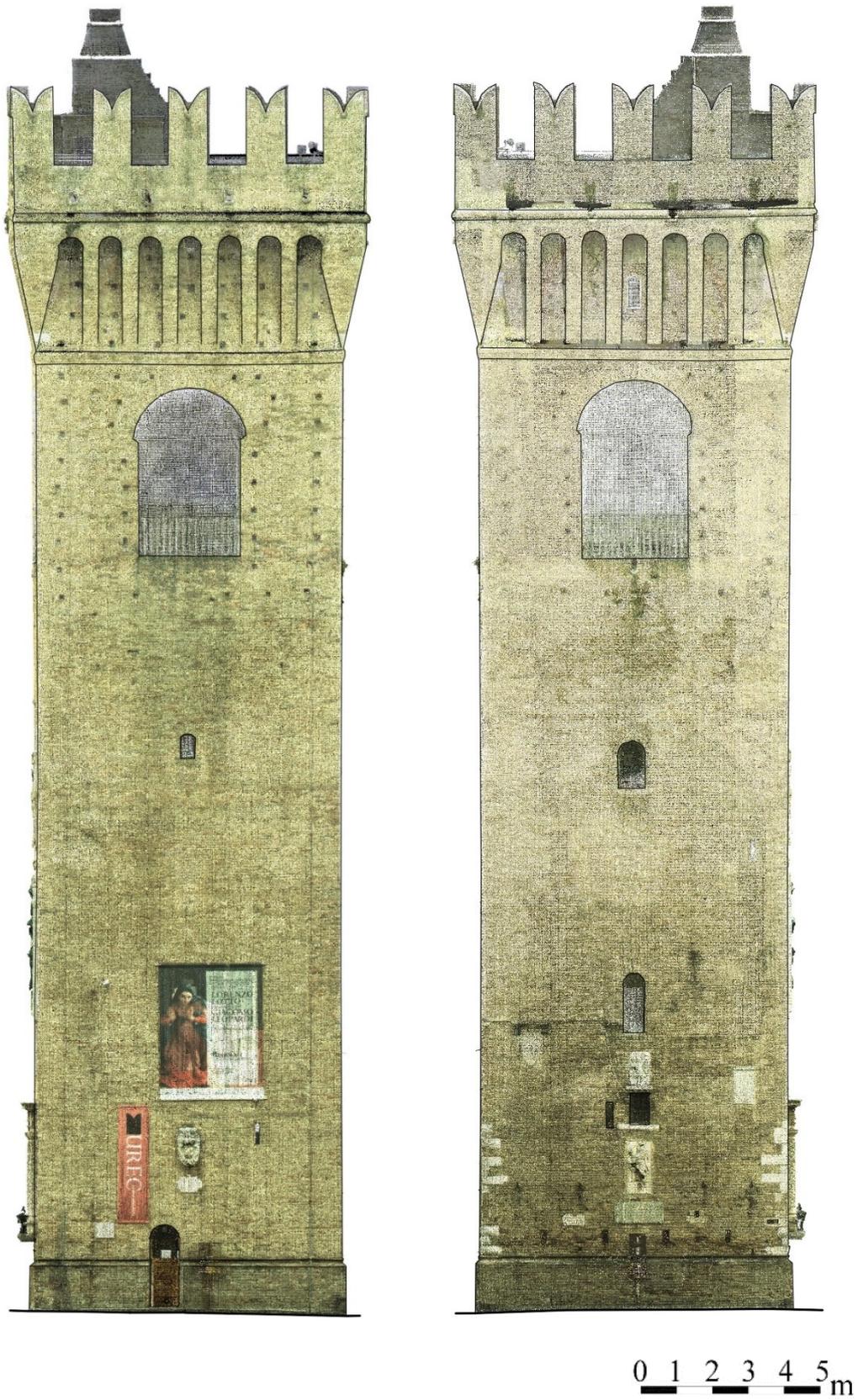


Figura 4.15 - A sinistra prospetto est (ingresso), a destra prospetto ovest



Figura 4.16 - A sinistra prospetto sud, a destra prospetto nord

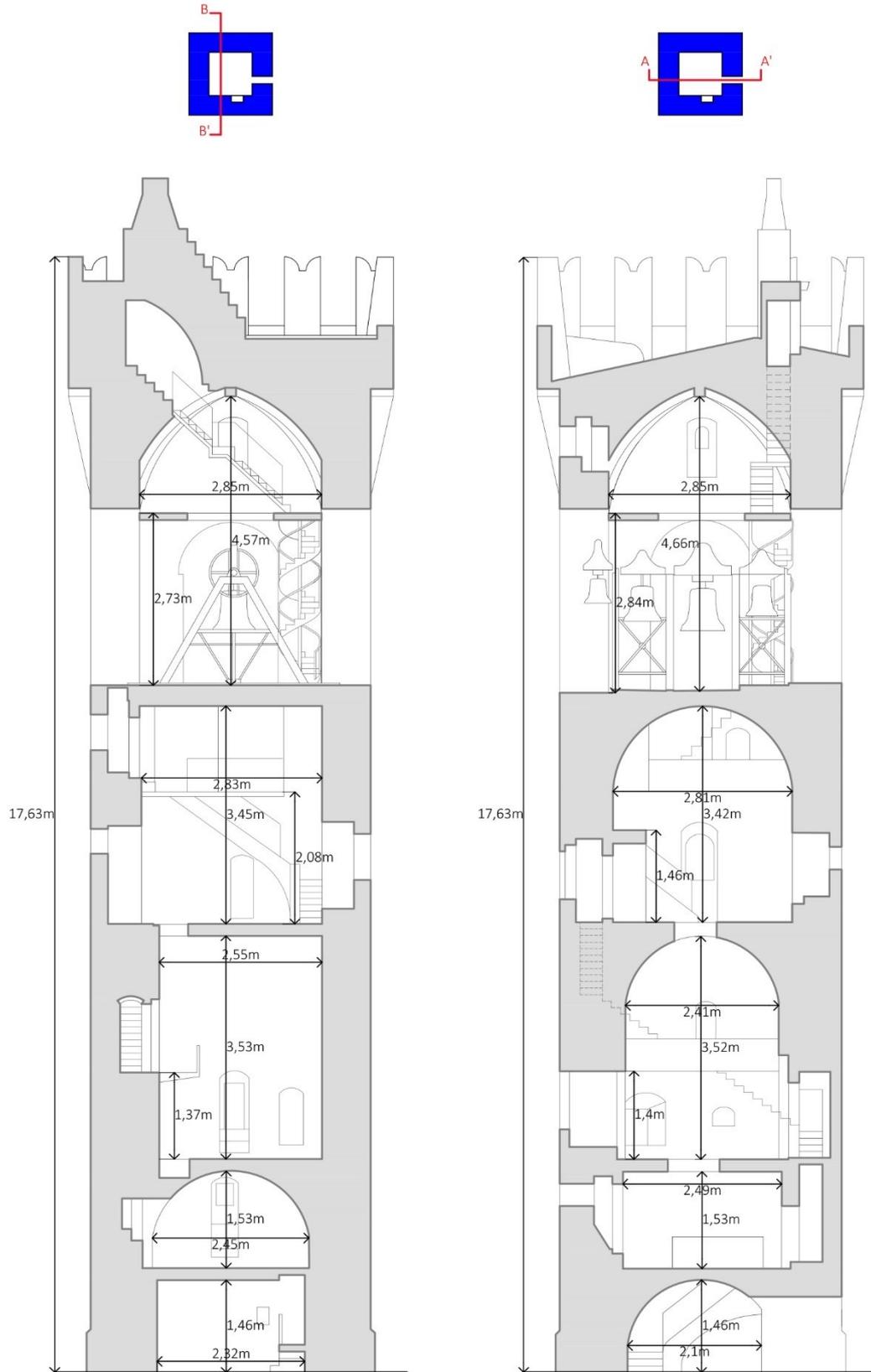


Figura 4.17 - A sinistra sezione B-B', a destra sezione A-A' scala 1:200

4.2 Confronto con rilievo tradizionale

Il processo del *reverse engineering* è stato messo in opera per ricavare dalla *point cloud* delle *slices* bidimensionali: le piante e le sezioni estratte sono state confrontate con gli elaborati ricevuti dal Comune di Recanati.

Sovrapponendo i due disegni rispetto al baricentro si ha che la differenza tra i due sondaggi è notevole:

- La pianta non è perfettamente quadrata: in ogni sezione i lati hanno dimensioni diverse e lo scarto è sempre inferiore a *10 centimetri*. Unica eccezione è il primo livello, in cui la variazione tra le lunghezze è dell'ordine di *6 millimetri* e interessa solo due lati;
- A ogni livello si riscontrano scostamenti lungo il perimetro, di dimensioni e posizione variabili e mai superiori a *17 centimetri*: ciò potrebbe essere dovuto al profilo irregolare della muratura, che non è stata messa in opera perfettamente a piombo;
- All'interno del volume sono presenti molte nicchie: non sempre corrispondono perfettamente per forma e misura, in particolare nelle prime quattro sezioni, rispettivamente a quota *+0,99 m*; *+5,38 m*; *+8 m*; *+10,1 m*;
- Gli unici elementi che hanno una collocazione pressoché identica sono le scale e le aperture.

Di seguito è riportata la sovrapposizione tra i due elaborati in cui sono stati messi in evidenza gli spostamenti più significativi: in grigio è rappresentato il rilievo del Comune e in azzurro la scansione del laser scanner.

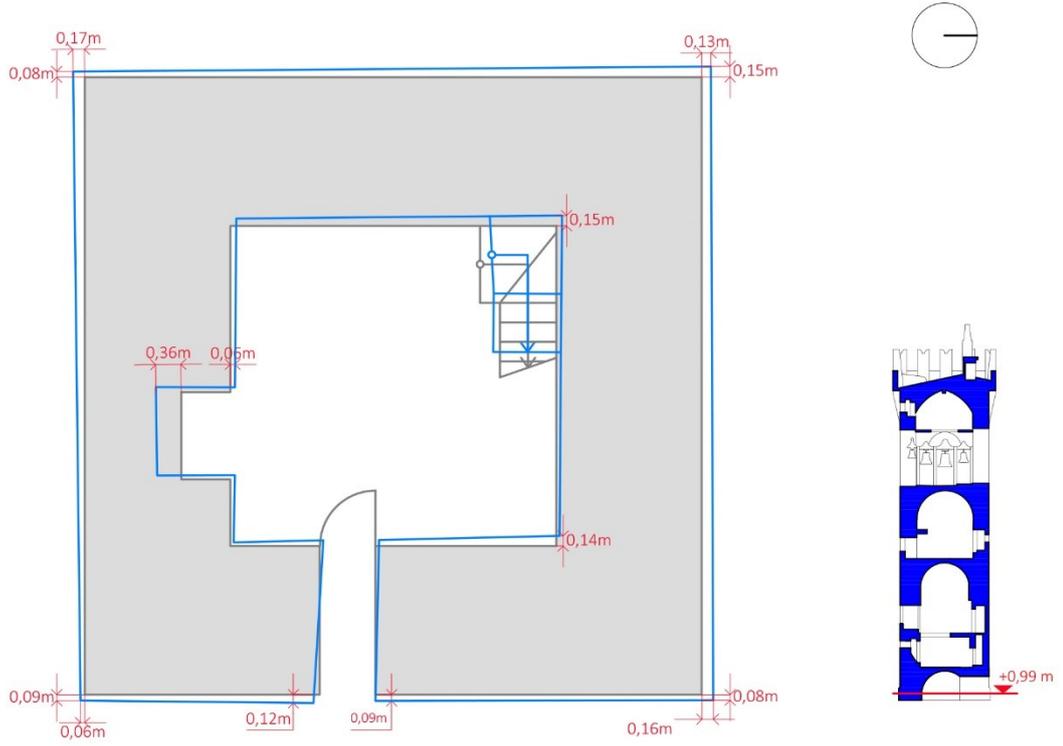


Figura 4.18 - Quota +0,99 m scala 1:100

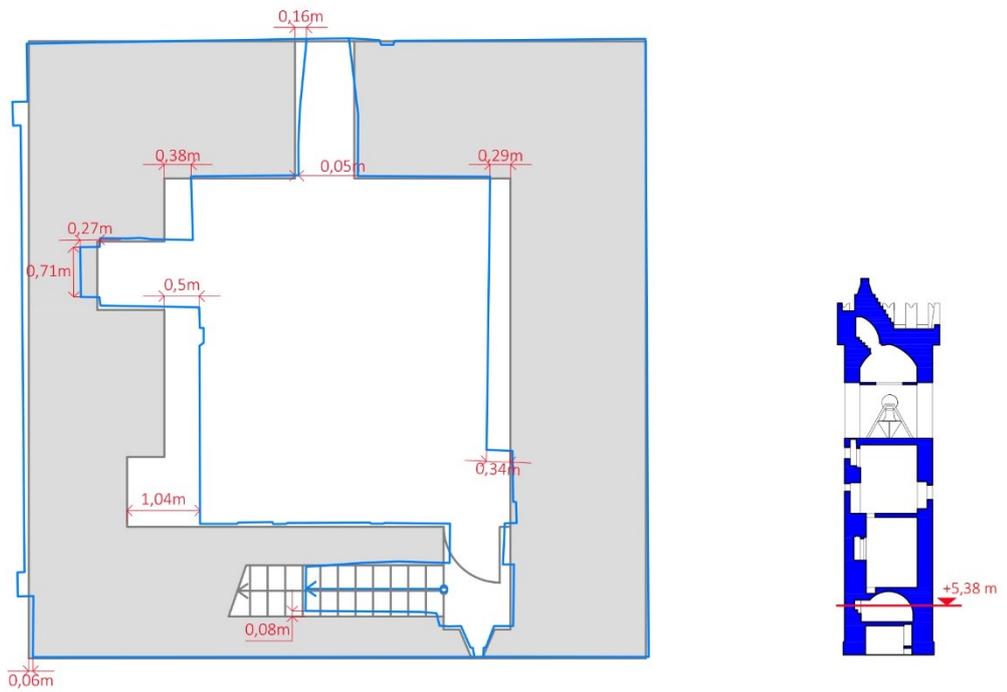


Figura 4.19 - Quota +5,38 m scala 1:100

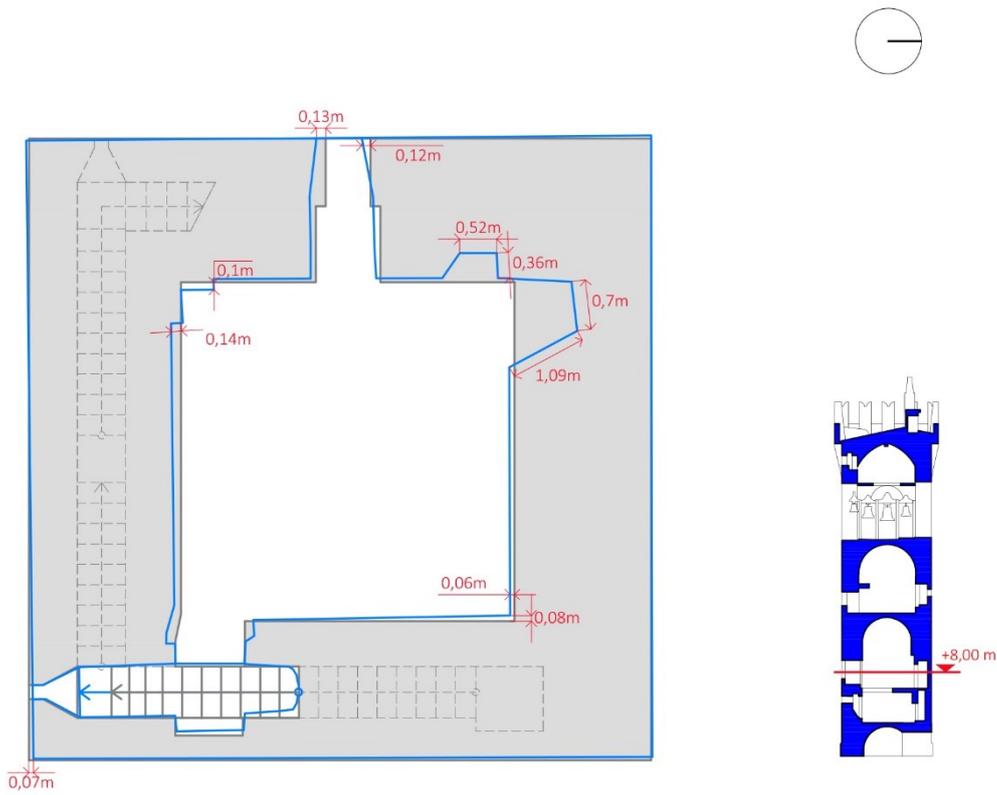


Figura 4.20 – Quota +8,00 m scala 1:100

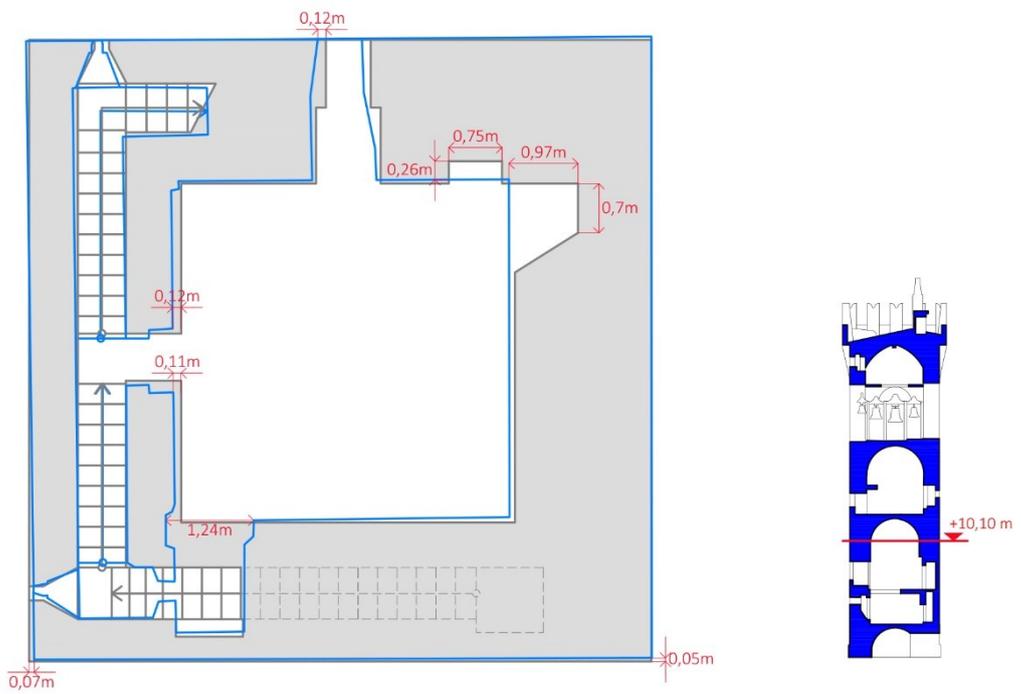


Figura 4.21 – Quota +10,10 m scala 1:100

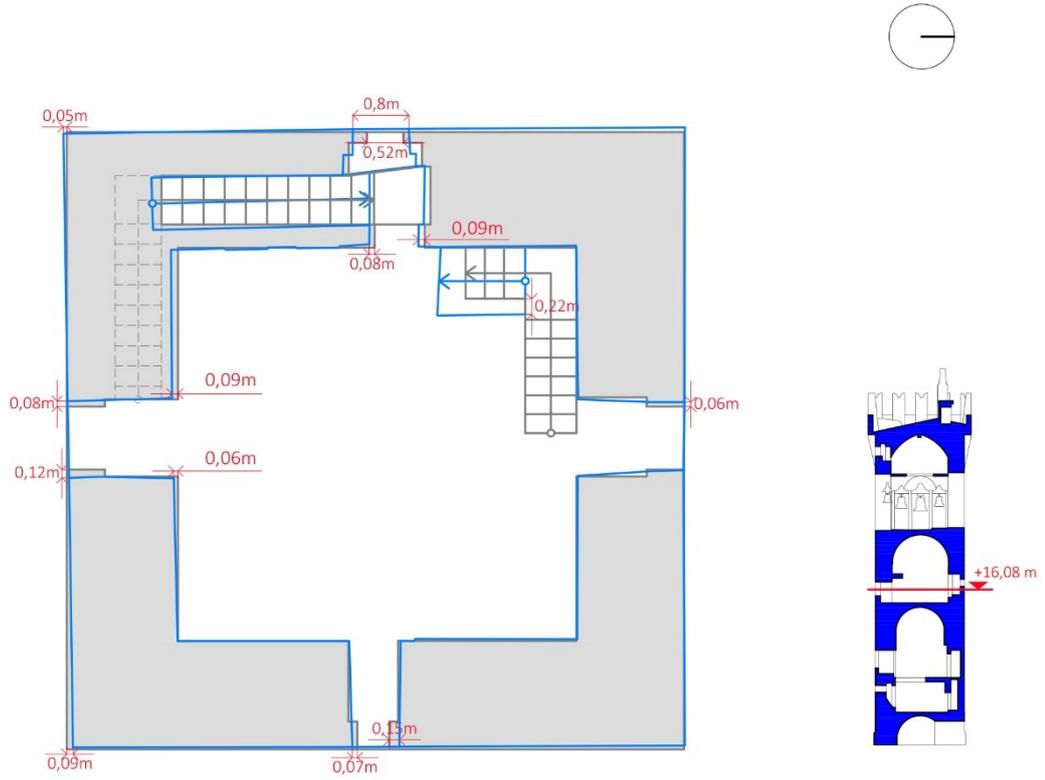


Figura 4.22 – Quota +16,08 m scala 1:100

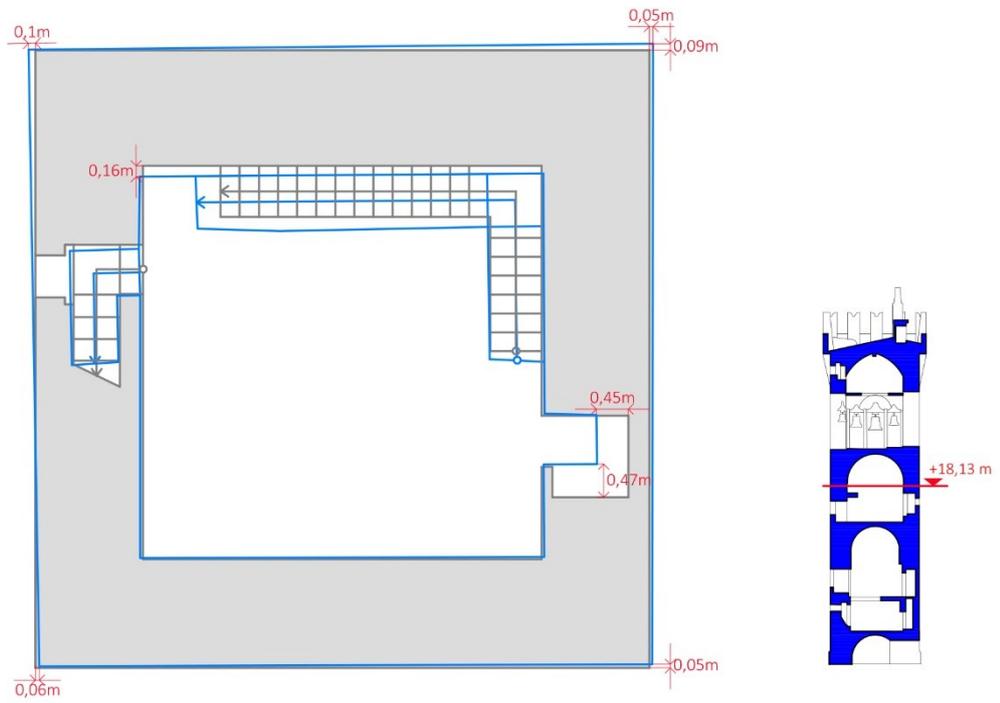


Figura 4.23 – Quota +18,13 m scala 1:100

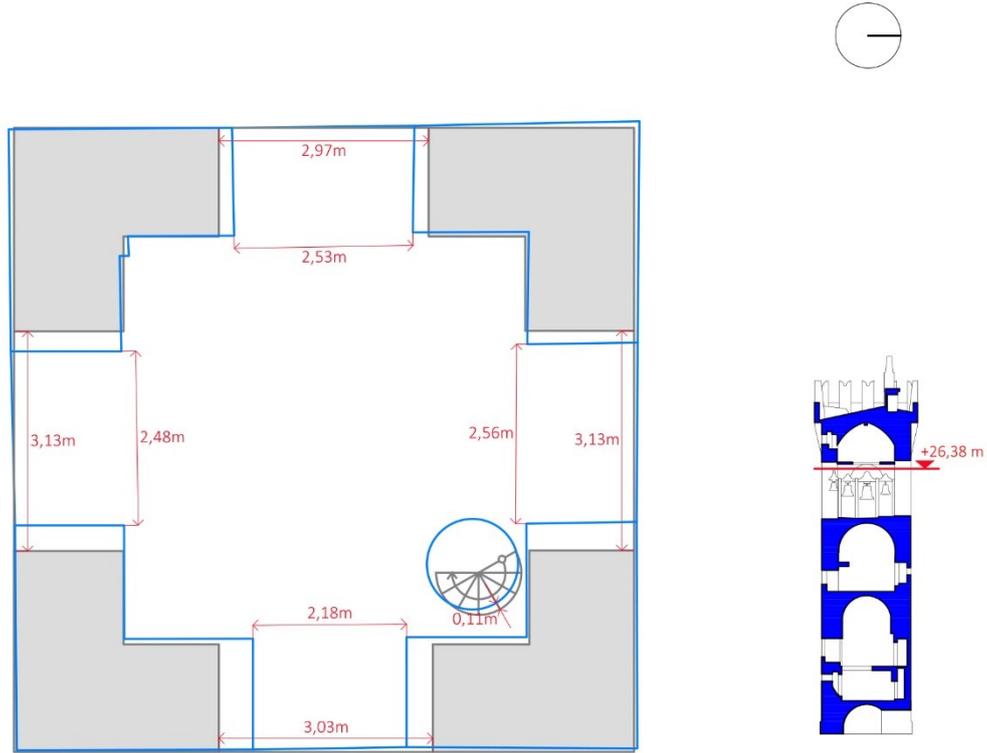


Figura 4.24 – Quota +26,38 m scala 1:100

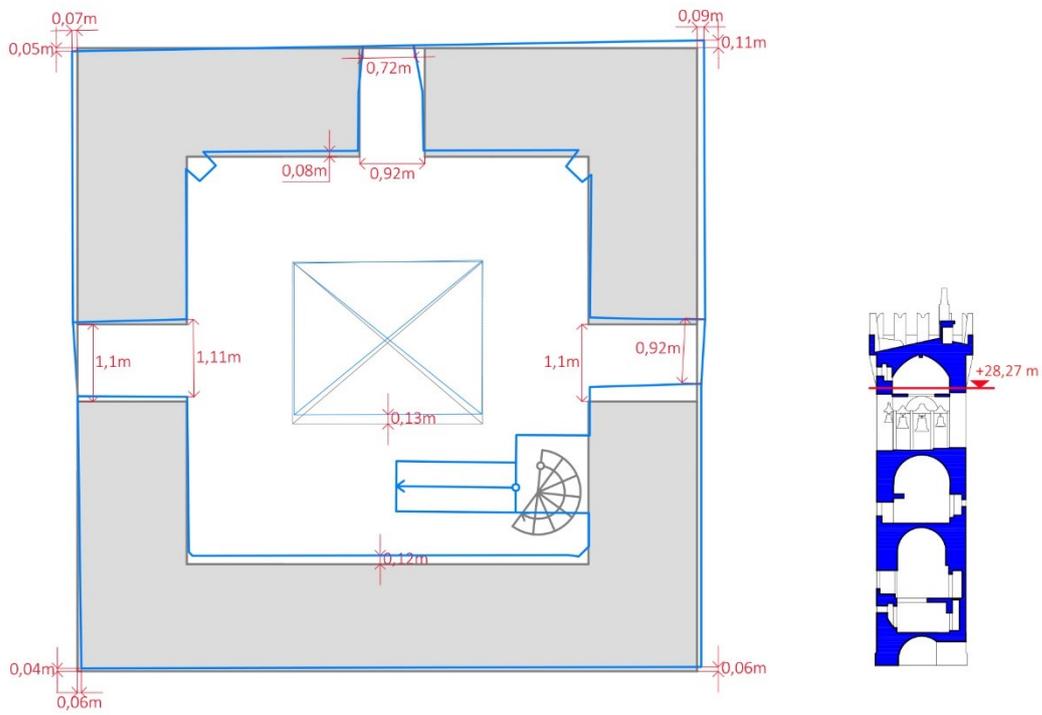


Figura 4.25 – Quota +28,57 m scala 1:100

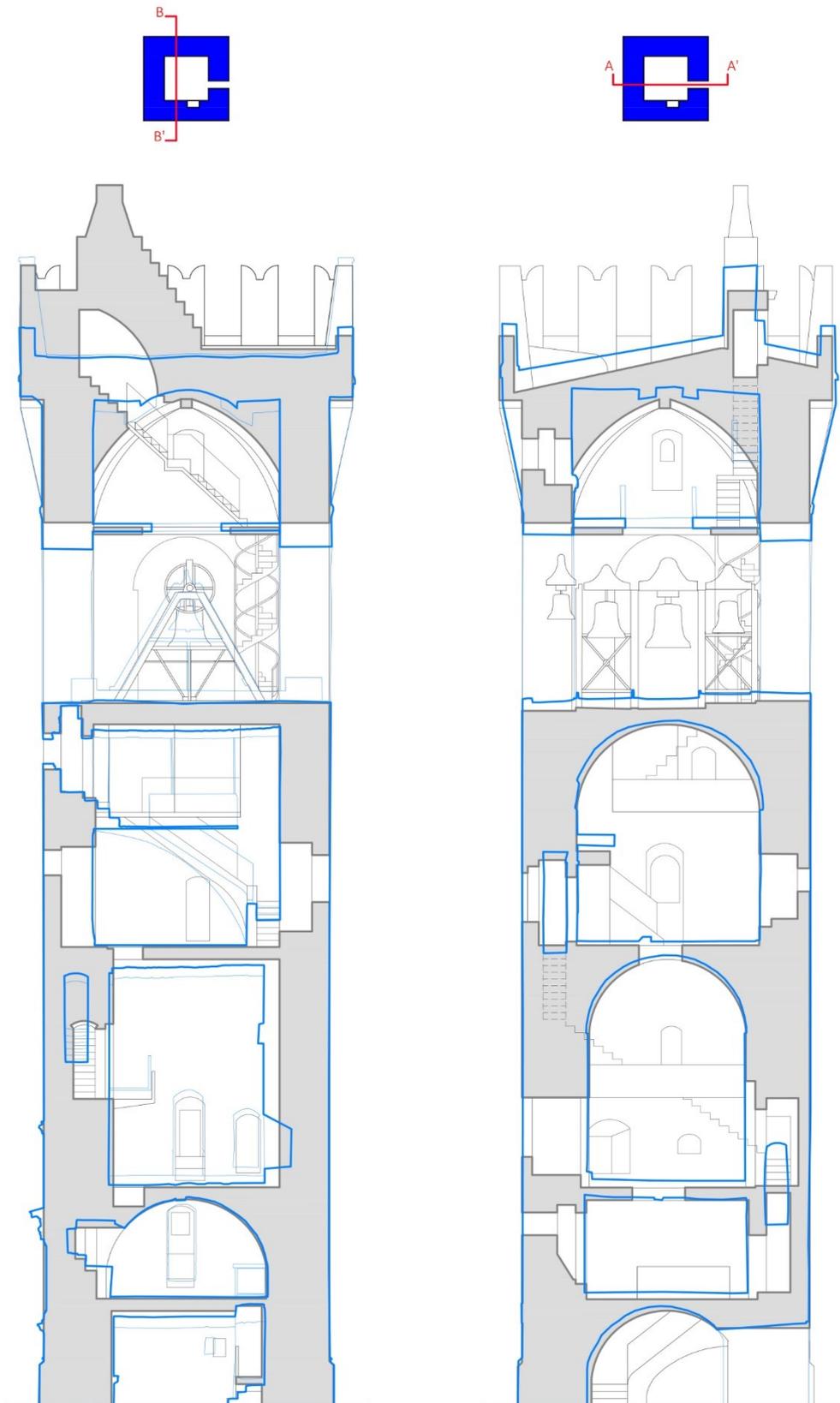


Figura 4.26 - Confronto tra sezioni: a sinistra B-B' a destra A-A' scala 1:200

4.3 Fasi della realizzazione del modello dalla nuvola di punti

Il primo modello è stato realizzato attraverso un processo di *reverse engineering*: tramite una scansione 3D e la conseguente elaborazione in un software CAD è stato possibile digitalizzare la Torre del Borgo.

La precisione e l'affidabilità dei dati di acquisizione per la completa documentazione e condivisione sono noti, ma per ottimizzare appieno il *data mining* bisognerebbe risolvere l'interoperabilità tra il punto di partenza, in questo caso la *point cloud*, e i sistemi informativi, in quanto lo stesso modello 3D è gestito per risolvere problemi in diversi campi disciplinari (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

4.3.1 Trattamento dei dati in Cyclone

Le 53 stazioni di acquisizione sono state allineate con il software *Cyclone*: si hanno complessivamente *996197028 punti*, che delineano non solo la torre ma anche l'intera piazza e gli edifici limitrofi, poiché raggiunti dalla portata del *laser scanner*.

Seguono le operazioni preliminari di pulizia volte a isolare la torre dal contesto e dagli elementi che non sono oggetto di studio.

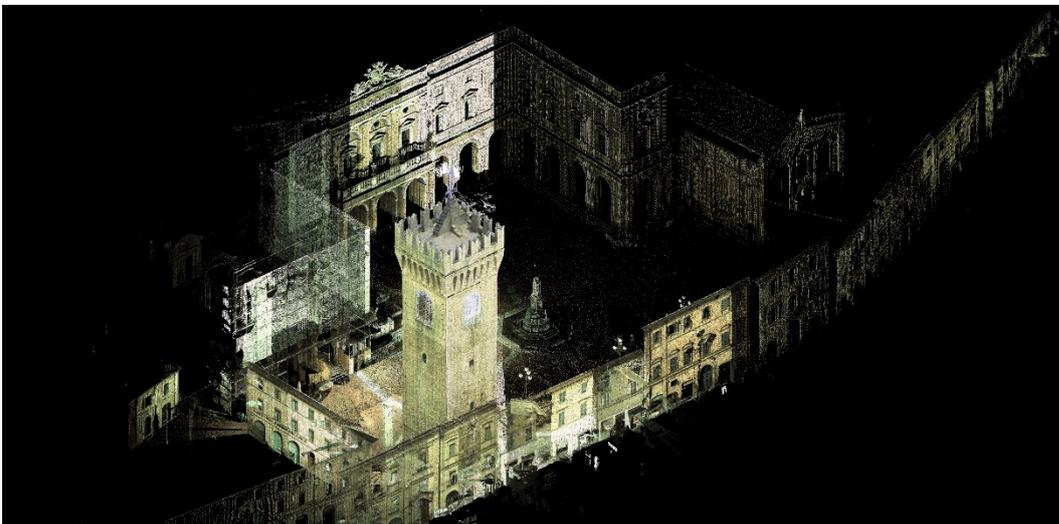


Figura 4.27 - Rappresentazione a colori delle acquisizioni: lato Nord-Ovest

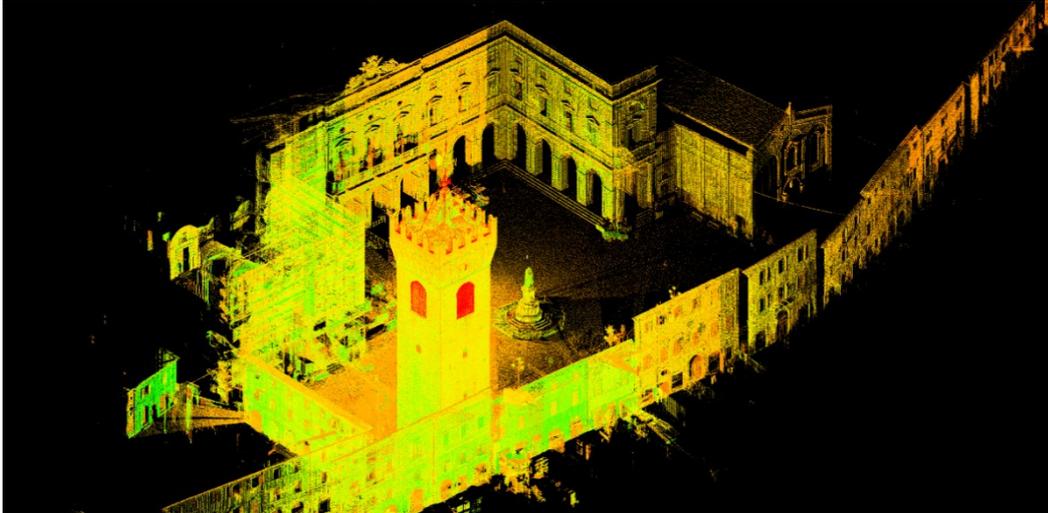


Figura 4.28 - Rappresentazione in RGB delle acquisizioni: lato Nord-Ovest

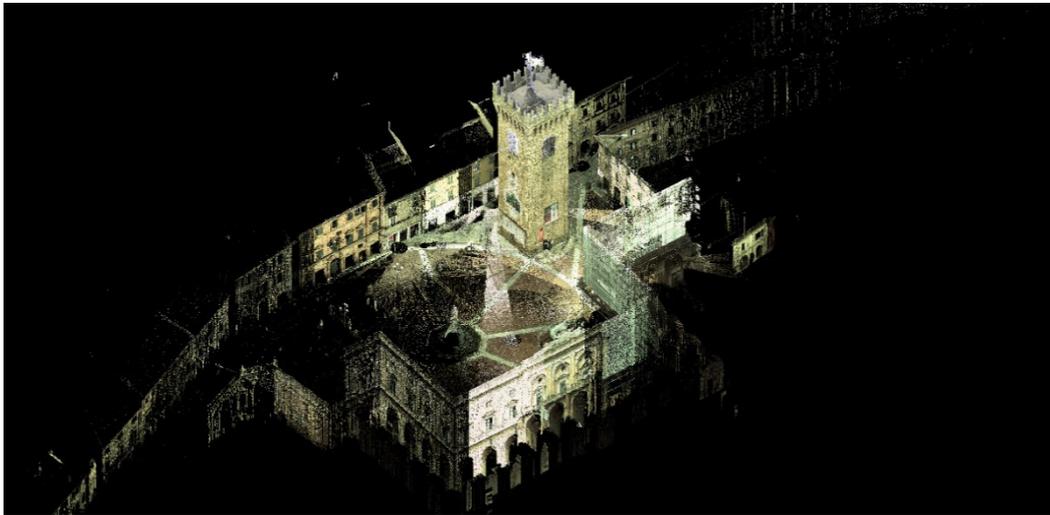


Figura 4.29 – Rappresentazione a colori delle acquisizioni: lato Sud-Est

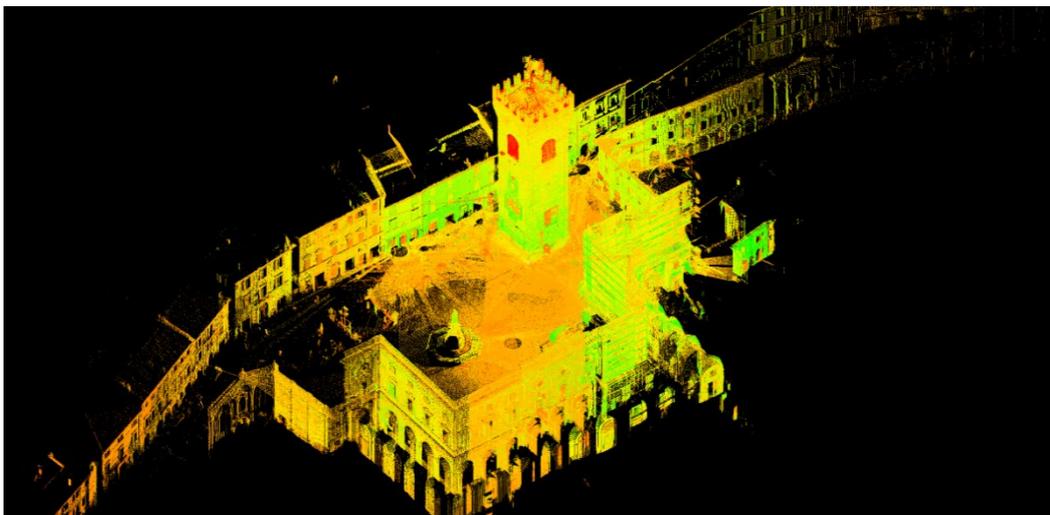


Figura 4.30 – Rappresentazione in RGB delle acquisizioni: lato Sud-Est

4.3.2 Creazione ed editing del modello mesh in Geomagic Wrap

Una volta isolata, la nuvola di punti, rappresentante la sola torre, viene importata in *Geomagic Wrap*. Quest'ultima è ora costituita da un totale di 221.814.970 punti.

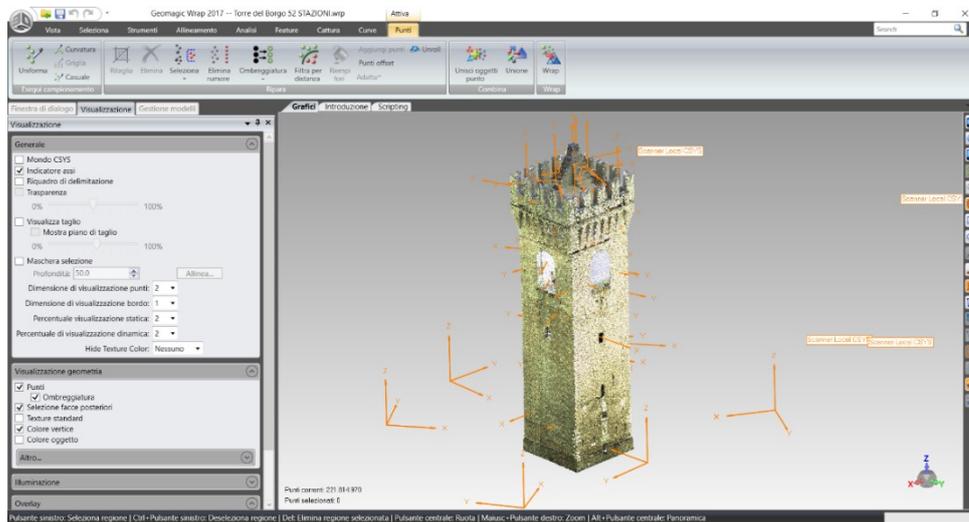


Figura 4.31 – Nuvola di punti: 52 stazioni

L'iter del trattamento dei dati prevede in primis la pulizia della nuvola: devono essere eliminati tutti gli elementi non strutturali, come ringhiere e scale in acciaio; la cella campanaria (travi e concerto) e le nuove realizzazioni derivanti dal restauro del 2015, ad esempio il solaio in acciaio e vetro al livello 4 e il ballatoio a quota 3.

A seguito della pulizia, la nuvola è costituita da 183.544.487 punti; le scansioni vengono unite in un'unica stazione, comprendente quindi la sola muratura esterna e i solai, con un numero di 168.006.926 entità.

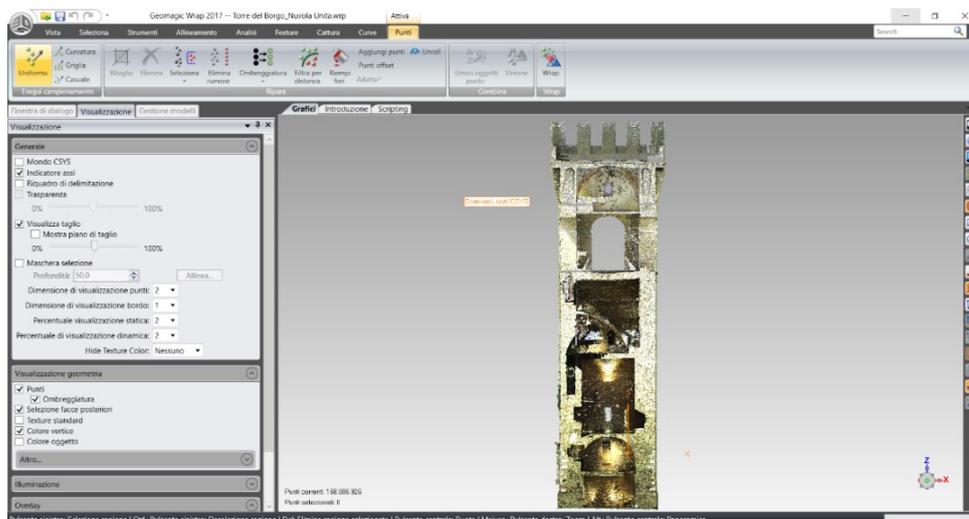


Figura 4.32 – Unione delle stazioni e nuvola pulita

Si prosegue con la creazione della *mesh*, che a una prima osservazione non risulta del tutto uniforme: l'operazione precedente ha comportato delle irregolarità nella superficie dovute principalmente a parti mancanti; inoltre l'algoritmo che ha generato la maglia ha introdotto anche elementi molto piccoli e in alcuni punti frastagliati.

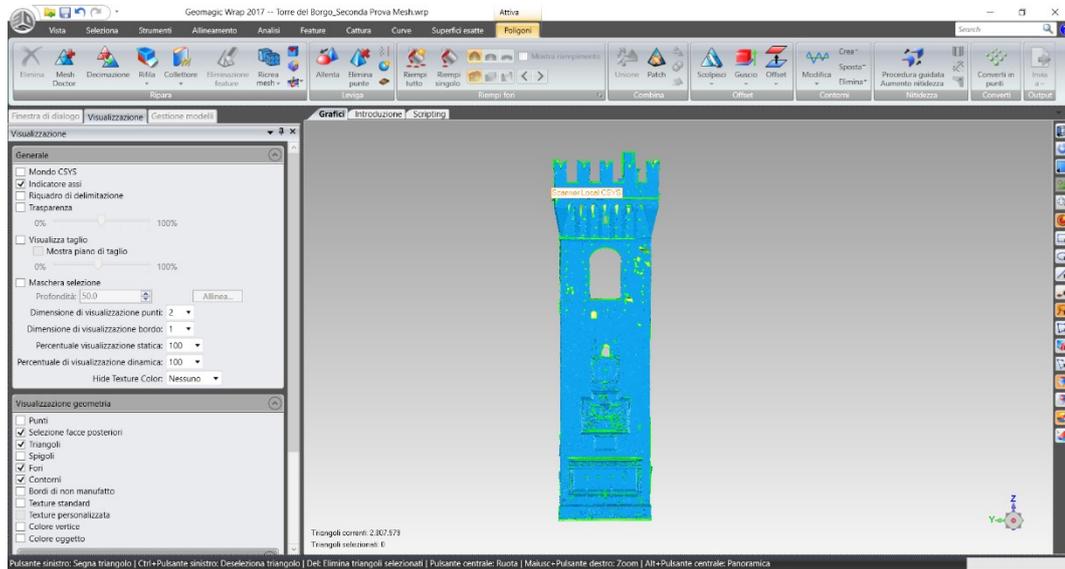


Figura 4.33 - Creazione delle mesh: 2.007.919 triangoli e 10.561 fori

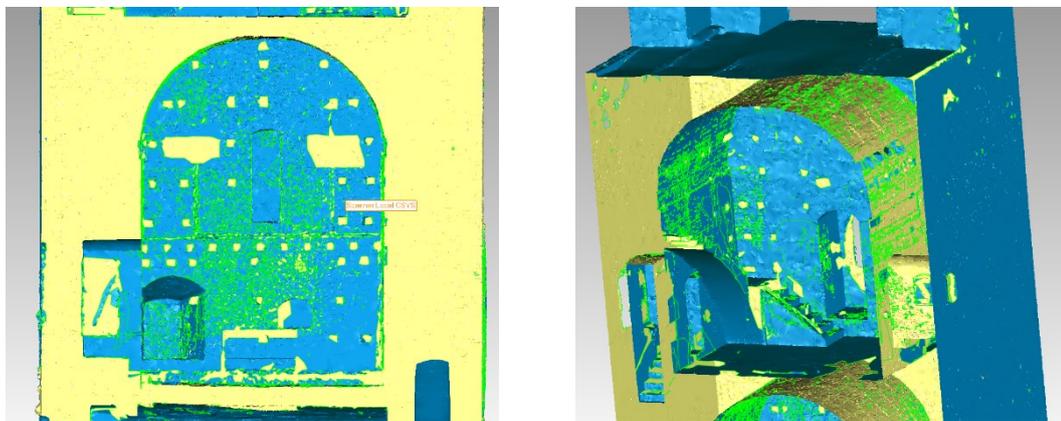


Figura 4.34 -Irregolarità nelle mesh

A causa di questa morfologia, si devono ripristinare le informazioni mancanti con appositi comandi che permettono di riempire i fori, a seconda della loro entità.

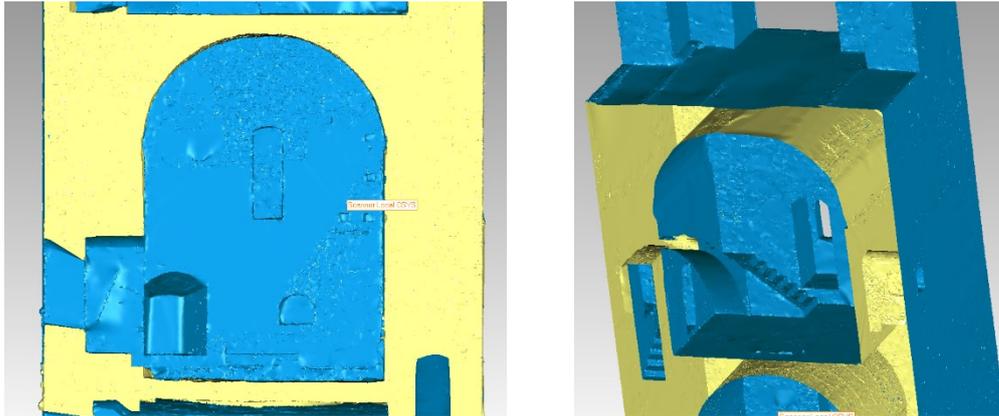


Figura 4.35 - Mesh riparata

Una volta rese uniformi e chiuse tutte le superficie corrispondenti alle murature e alle volte a botte, si definiscono i contorni, sia esterni sia interni, per preservare gli spigoli e i dettagli che altrimenti verrebbero smussati nello step successivo.

Con l'applicazione del comando *Mesh Doctor*, si analizza e si cerca di ridurre tutte le patologie della *mesh*, quali ad esempio auto-intersezioni, bordi non *manifold*, punte e piccole componenti. Tale operazione ha il grande vantaggio di diminuire queste irregolarità e può essere ripetuta più di una volta, ma tende a livellare notevolmente i bordi.

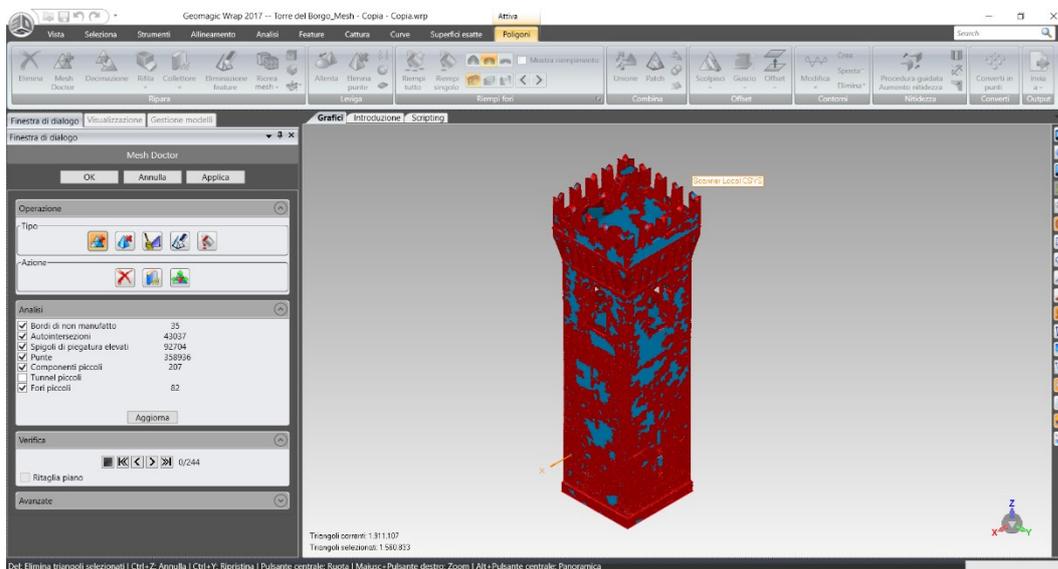


Figura 4.36 Mesh Doctor: in rosso i triangoli che devono essere riparati

L'iterazione del *Mesh Doctor* non ha portato all'azzeramento dei parametri sopracitati, anzi, alla soglia dell'undicesima ripetizione, si è verificata una perdita considerevole di

dettaglio, in particolare in corrispondenza dei merli e dei beccatelli, caratteri distintivi della Torre del Borgo.

Per questo motivo, si è proseguito con la fase successiva della decimazione: l'eccessivo numero di triangoli avrebbe sicuramente comportato problemi di interoperabilità (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019), per questo si è scelta la quota di 60.000, giusto compromesso tra quantità e qualità di elementi che descrivono la torre.

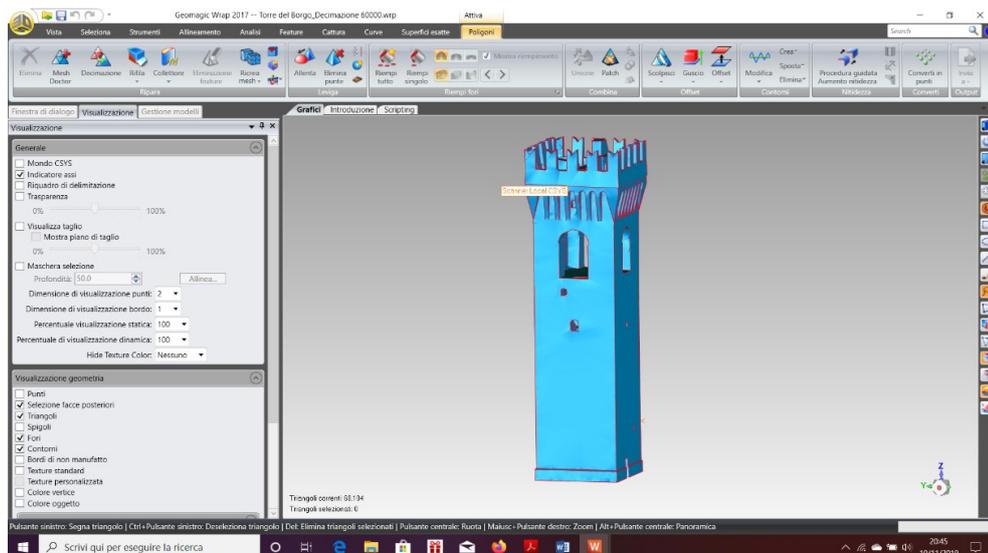


Figura 4.37 - Il modello a seguito della decimazione: è costituito da 60.000 triangoli

Si affronta nuovamente la questione delle anomalie, che sono sopravvissute anche alla decimazione: dal momento che il *Mesh Doctor* risulta inefficace, soprattutto dopo la notevole trasformazione del numero dei triangoli, si procede manualmente alla riduzione delle auto-intersezioni e a ricreare la *mesh* qualora fosse stata approssimata da triangoli di notevoli dimensioni.

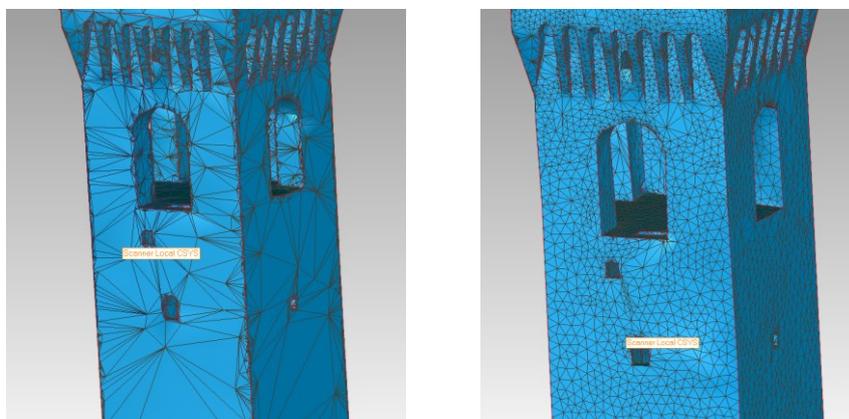


Figura 4.38 - Confronto: a sinistra i triangoli derivati dalla decimazione, a destra i triangoli dopo il remesh

Al termine di questa operazione si ottiene un modello con *78.592 triangoli* che conserva ancora delle irregolarità che non possono essere superate con gli strumenti che il software *Geomagic* mette a disposizione. Infatti, ogni tentativo di importazione in *Midas* a partire da questo campione è risultato fallimentare.

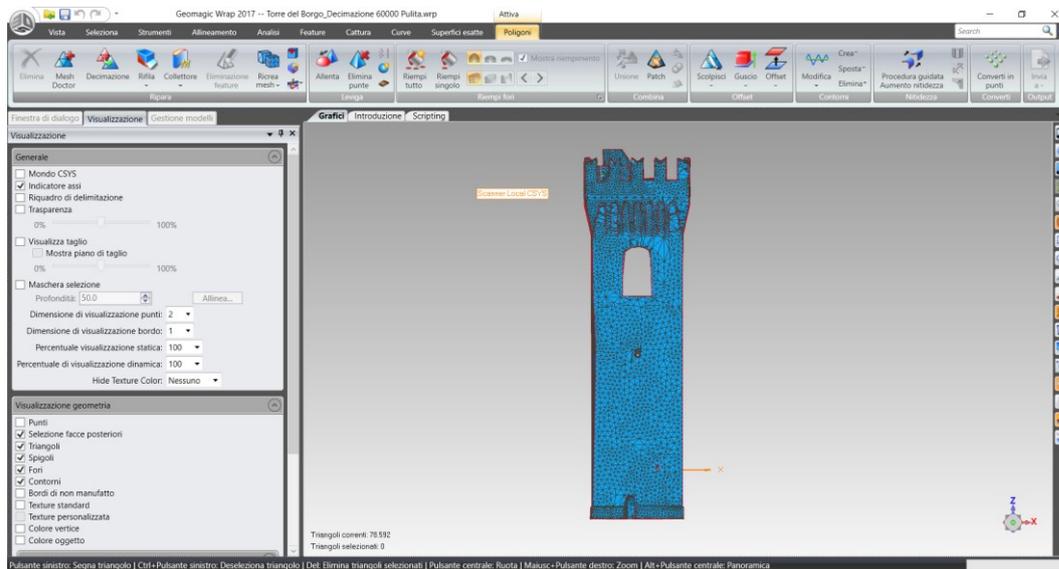


Figura 4.39 - Modello finale

4.3.3 Ultime modifiche in 3DReshaper

Il software *3DReshaper* ha funzioni analoghe a *Geomagic Wrap*, ma si è rivelato uno strumento più potente poiché ha permesso la risoluzione di tutte le anomalie che rendevano il file non interoperabile.

Attraverso il comando *Ripara*, è stato possibile correggere automaticamente tutte le difformità della *mesh*; e, grazie alla facoltà di poter scegliere il grado di levigazione, si è optato per una smussatura lieve ma necessaria, in quando il software *Midas FEA* non interpreta bene i bordi netti dei triangoli (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

Questo problema era stato riscontrato nell'elaborazione dei dati della torre campanaria del Duomo di San Ciriaco, ad Ancona, poiché la *mesh* era stata esclusivamente trattata in *Geomagic* e i vari tentativi falliti di importazione in *Midas FEA* avevano fatto emergere questa limitazione.

In realtà il comando *Ripara* di *3DReshaper* consente di ovviare anche a questo problema, infatti successivamente è stato intrapreso il tentativo, riuscito con successo, di importare il modello direttamente nel software di calcolo, senza passare prima per la levigazione.

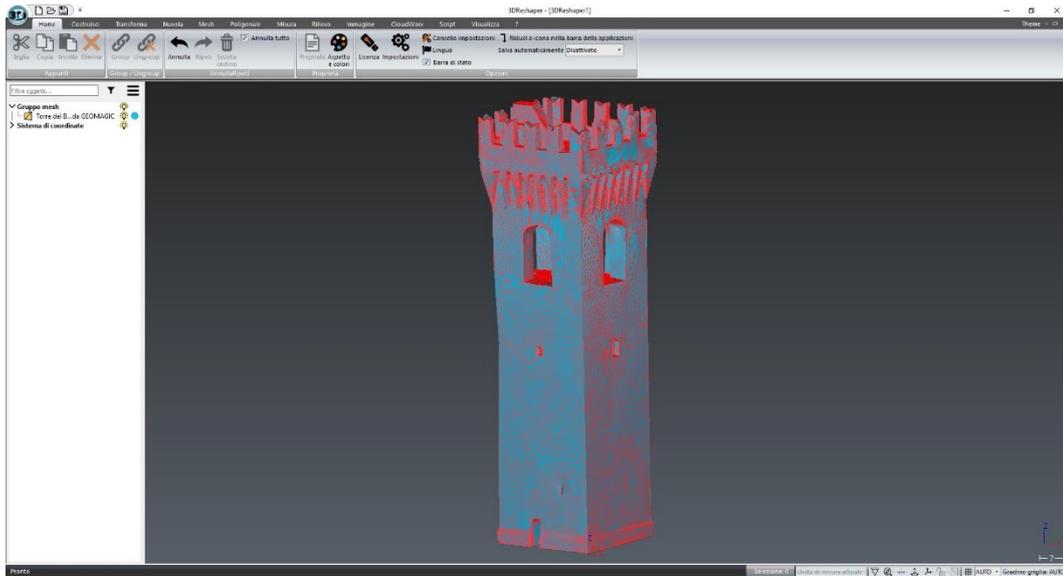


Figura 4.40 - Modello importato da Geomagic

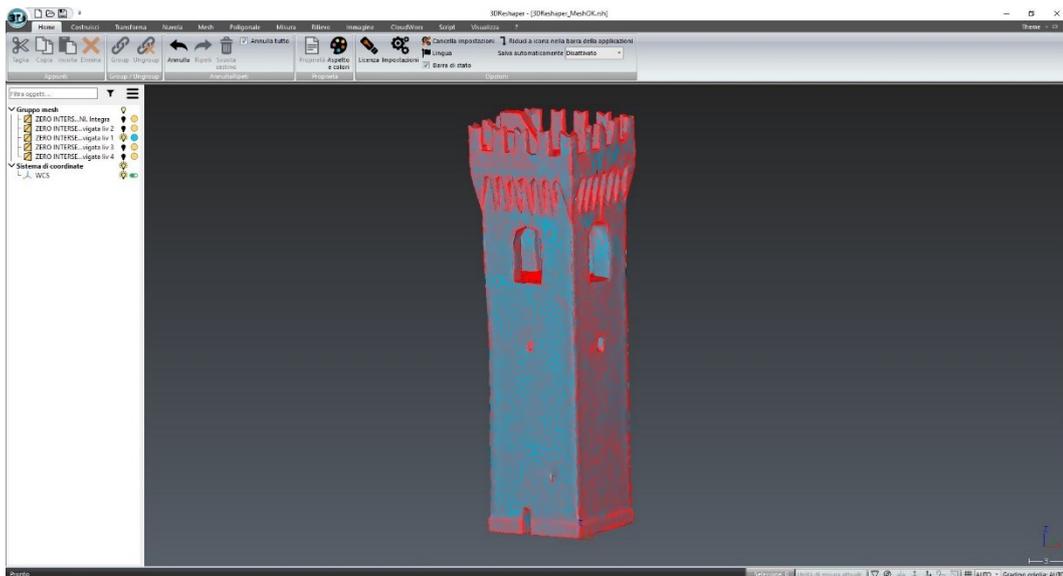


Figura 4.41 – Modello finale ottenuto dopo la levigazione: 78523 triangoli



Figura 4.42 – Confronto globale tra il modello in Geomagic (sinistra) e quello finale in 3D Reshaper (destra)

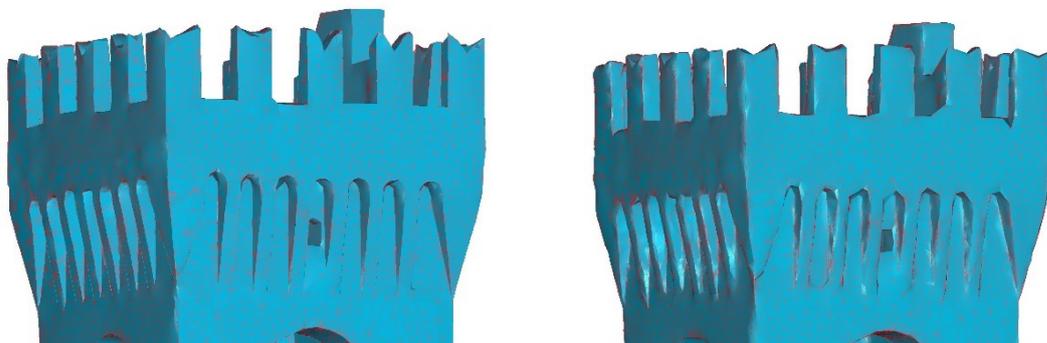


Figura 4.43 – Confronto dei particolari più significativi, quali beccatelli e merli, che hanno reso necessario l'ulteriore step qui descritto: a sinistra il solido in Geomagic e a destra quello in 3D Reshaper

4.3.4 Creazione del modello chiuso in Rhinoceros

Una volta realizzato il modello finale lo si esporta nel formato *.stl (binario)* compatibile con il software *Rhinoceros 6*.

Operazione successiva è quindi quella di creare i presupposti affinché il modello che si ottiene dalle acquisizioni della torre campanaria sia convertito in un modello a elementi finiti, ovvero in un solido completamente riempito al suo interno di *brick*.

A seguito dell'importazione si eseguono dei controlli per appurare l'effettiva validità della *mesh*: si controlla che le normali siano tutte orientate nella stessa direzione e la presenza di eventuali bordi aperti o *non manifold*.

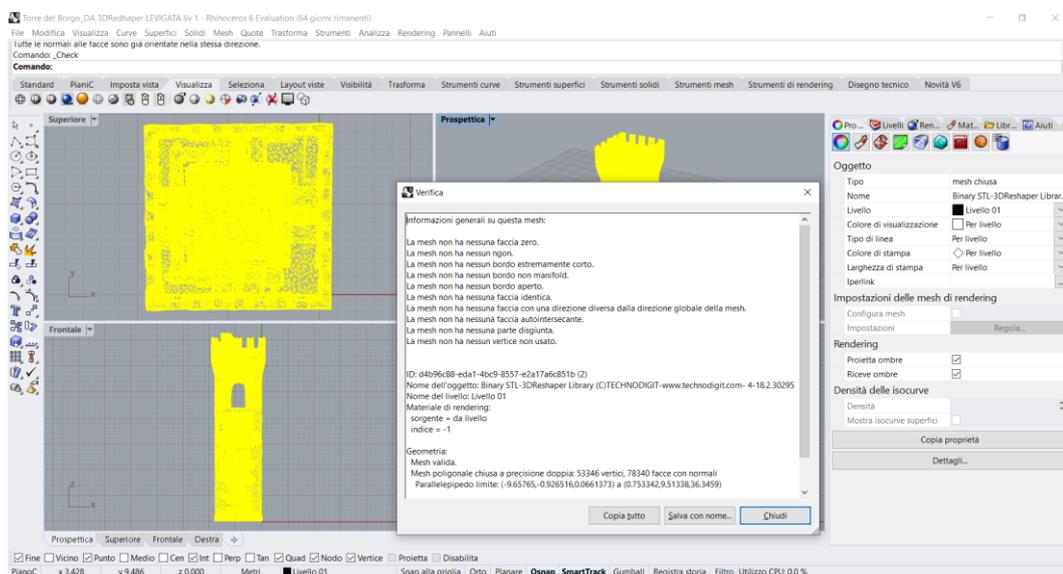


Figura 4.44 – Procedura di verifica della mesh importata da 3DReshaper

A seguire, con il comando *MeshANurb*, si converte la *mesh* formata da triangoli separati in una polisuperficie chiusa e si verifica l'integrità dell'oggetto appena creato.

La fase di conversione è conclusa e si può esportare il file nel formato STEP, standard internazionale che consente lo scambio di definizioni complete di prodotti tra sistemi CAD (*Computer Aided Design*), CAE (*Computer Aided Engineering*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) differenti.

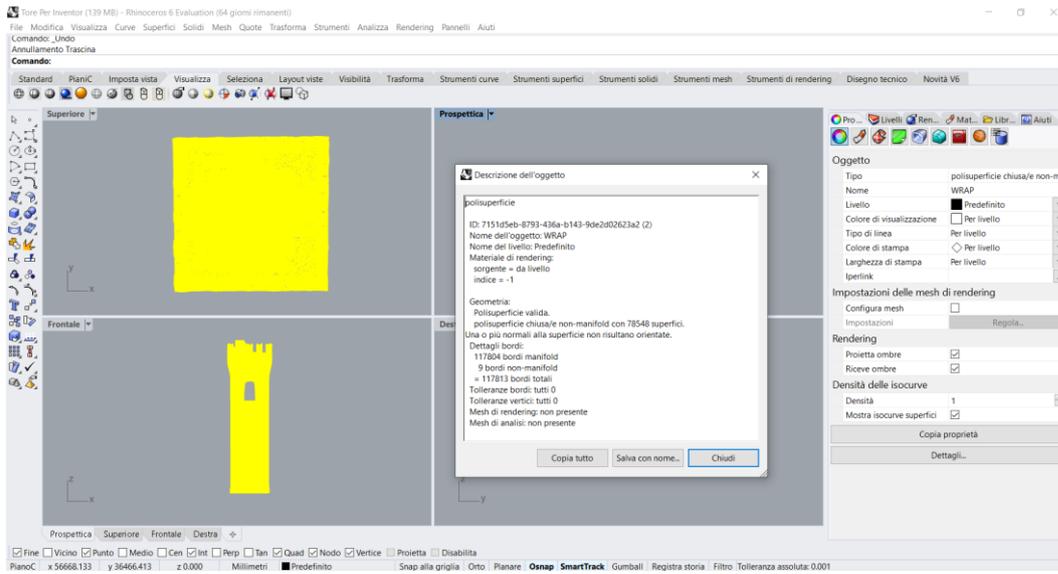


Figura 4.45 - Verifica delle polisuperficie chiusa

4.3.5 Conversione del modello in Inventor

Anche se il solido è riconosciuto per intero in *Midas FEA*, ogni tentativo di realizzare una *mesh* solida risulta fallimentare. Per ovviare a questa difficoltà, una soluzione efficace è risultata quella di dividere l'oggetto in quattro porzioni in modo da articolare l'operazione successiva in quattro passaggi.

Il file finale è nuovamente esportato in formato *STEP* ed è pronto per la fase preliminare nel prossimo ambiente software.

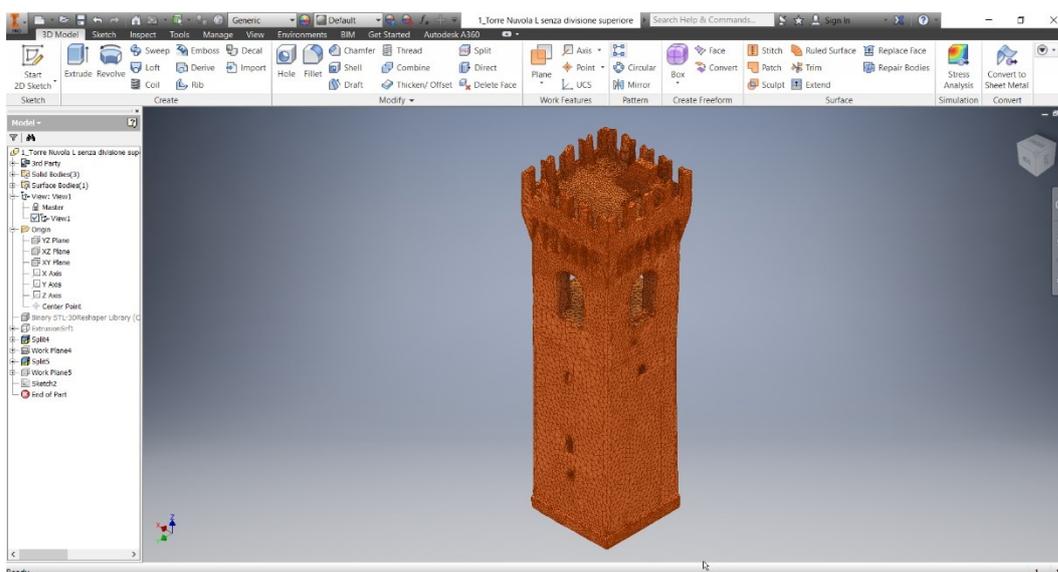


Figura 4.46 – Modello in Inventor prima della divisione

4.3.6 Importazione in Midas FEA e creazione del modello agli elementi finiti

La modellazione agli elementi finiti consente di rappresentare le geometrie della struttura reale attraverso gli elementi *brick*: hanno tre gradi di libertà per ciascun nodo, corrispondenti alle tre traslazioni, non hanno rotazioni e non trasferiscono rigidità per gli altri gradi di libertà. Tali caratteristiche fanno sì che il modello simuli il comportamento della struttura reale e che quindi possa essere analizzata nella sua risposta globale (Quattrini, Clementi, Lucidi, Giannetti, & Santoni, 2019).

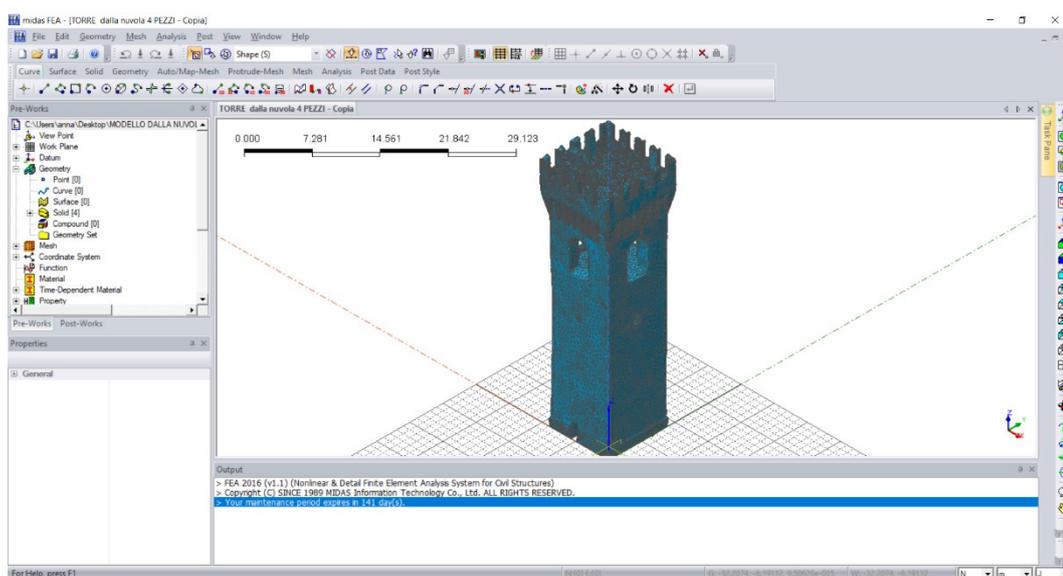


Figura 4.47 – Modello correttamente importato in Midas FEA

Successivamente all'importazione del *file STEP* ottenuto in *Inventor* si deve:

- Definire e assegnare i materiali;
- Creare la mesh solida;
- Definire e assegnare i vincoli di incastro alla base;
- Definire e assegnare i carichi statici.

La determinazione delle proprietà meccaniche delle murature esistenti dipende dal livello di conoscenza raggiunto sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive, come indicato al *Capitolo 8 delle NTC 2018*, in continuità con quanto accadeva con le previgenti *NTC 2008*. È utile far riferimento alla *Circolare Ministeriale n° 7 del 21/01/2019* la quale fornisce i valori di riferimento dei parametri meccanici (min e max) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura esistente, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti

semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte.

È stato considerato un unico materiale per le strutture verticali, essendo completamente in muratura di mattoni e calce, e anche la conformazione delle volte a botte è stata approssimata come muratura piena, dal momento che non è possibile definire come è stato realizzato il rinfiacco.

Tipologia di muratura	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	Min-max	Min-max	Min-max	Min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Figura 4.48 - Parametri meccanici delle murature, NTC2018

Per assegnare i materiali alla struttura si procede attraverso la definizione delle *mesh 3D*, che avranno intrinsecamente le caratteristiche della muratura: sono gli elementi con cui si discretizza il modello e andranno a rappresentare l'edificio nelle analisi compiute. Applicare le *mesh* significa suddividere il solido in tanti piccole parti, ciascuna caratterizzata da un materiale, e su cui poi verranno eseguite le varie analisi.

Attraverso il comando *Auto-mesh solid* si avvia la fase di *meshing* dei vari elementi, e per quanto riguarda la loro dimensione è il software stesso a consigliarne la più appropriata a rappresentare l'elemento.

In questo caso, per non appesantire il tempo di calcolo e non incorrere in errori di sistema si è optato per la dimensione di *1 metro*.

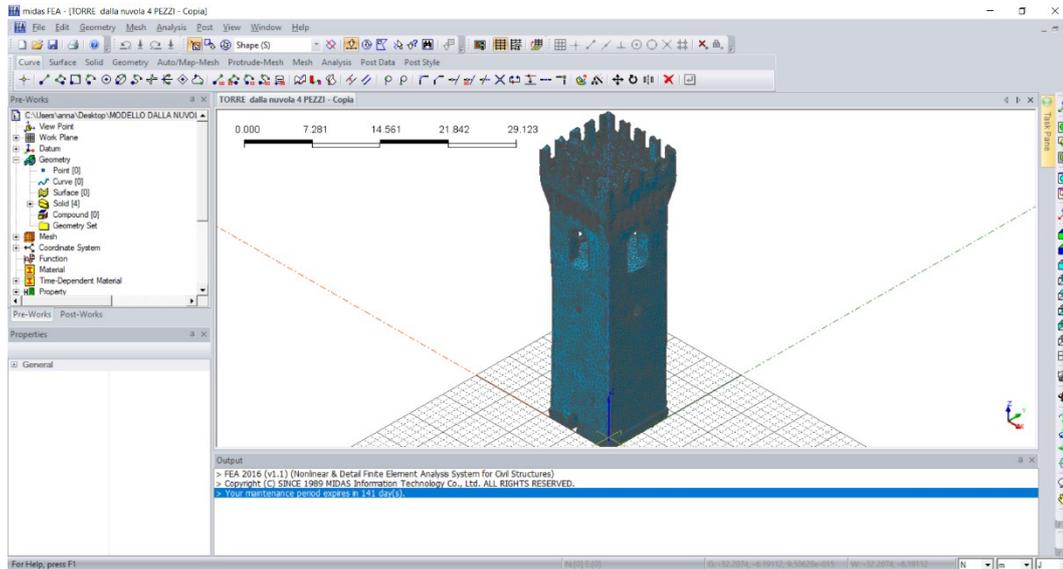


Figura 4.49 – Creazione della mesh 3D

A livello operativo, questa fase è risultata la più ostica, sia dal punto di vista delle tempistiche, sia per quanto riguarda i ripetuti tentativi effettuati. Si è giunti a questa configurazione dopo: *33 minuti* per *meshare* il primo pezzo in basso, *95 minuti* per il secondo, *137 minuti* per il terzo e *270 minuti* per il quarto e ultimo pezzo.

Come per il telaio equivalente, la struttura deve essere vincolata alla base: a tutti i nodi delle *mesh* alla base è stato applicato un vincolo di incastro.

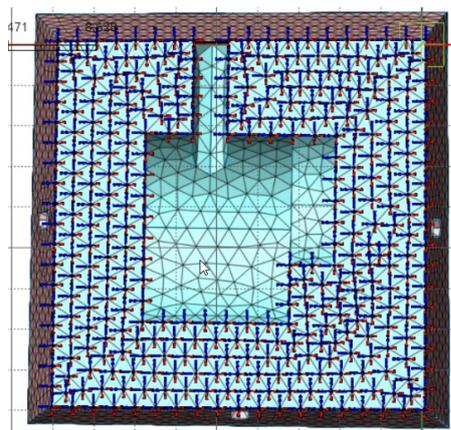


Figura 4.50 - Vincoli di incastro alla base della Torre

L'ultima operazione tra quelle preliminari per la creazione del modello a elementi finiti è la definizione e l'assegnazione dei carichi statici: il peso proprio delle *mesh*, che si riferisce

non solo alle pareti verticali ma anche alle volte a botte, è stato inserito automaticamente dal software tramite l'attivazione del comando *Body Force*.

Secondo quanto definito nel *paragrafo 2.5.1.3* delle *NTC 2018*, i carichi agenti in una struttura si dividono in:

- Pesi permanenti (G): azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poter essere considerata con sufficiente approssimazione costante nel tempo. Quali:
 - G1: peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, quando pertinente; forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);
 - G2: peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;
 - Spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione;
 - P: pretensione e precompressione;
 - Ritiro e viscosità;
 - Spostamenti differenziali;
- Azioni sismiche (E): azioni derivanti da terremoti
- Carichi variabili (Q): azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi tra loro. Possono essere:
 - Di lunga durata: agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;
 - Di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura.

Per quanto riguarda la quota di G_1 , non sono stati applicati carichi alle murature in quanto sono stati modellati tutti gli elementi strutturali e successivamente computati come *Body Force*.

Rientra nella voce G_2 il peso della cella campanaria, applicata come carico distribuito lungo il solaio corrispondente al livello 6.

Considerando che il concerto è formato da quattro campane in bronzo di diverse dimensioni, si ha che il carico di questa componente non strutturale è di $43,84 \text{ kN}$, così ripartito:

- Campana 1: diametro 1710 mm, peso 27,46 kN;
- Campana 2: diametro 1132 mm, peso 7,85 kN;
- Campana 3: diametro 1070 mm, peso 5,64 kN;
- Campana 4: diametro 800 mm, peso 2,89 kN.

Dato che la superficie su cui viene applicato il carico è di $52,23 \text{ m}^2$, si avrà che $G_2=0,84 \text{ kN/m}^2$.

I carichi variabili sono funzione della destinazione d'uso dell'opera, come descritto nella *Tabella 3.1.II* delle *NTC 2018*: per la Torre del Borgo è stata considerata la *Cat. H – Coperture e sottotetti accessibili per la sola manutenzione*, dove il valore dei carichi uniformemente distribuiti è $q_k=0,50 \text{ kN/m}^2$.

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	$\geq 6,00$ —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 — —	1,00 — —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

Figura 4.51 - Valori dei carichi di esercizio per e diverse tipologie di edificio, NTC 2018

Si ipotizza che il carico agisca in direzione verticale e lo si riferisce alla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

Il carico della neve al suolo dipende dalle caratteristiche locali di clima ed esposizione, considerata la variabilità delle precipitazioni nevose da zona a zona.

Il carico della neve è stato calcolato secondo la seguente espressione presente nella *Circolare Ministeriale n°7 del 2019 al paragrafo §3.4.1*:

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t$$

- q_s è il carico della neve sulla copertura
- μ_i è il coefficiente di forma per la copertura: considerando che l'angolo di inclinazione del tetto è compreso tra $0^\circ < \alpha < 30^\circ$, il valore di riferimento è 0,8;
- q_{sk} è il valore caratteristico di riferimento per la neve al suolo espresso in kN/m^2 per un periodo di ritorno di 50 anni: dato che Recanati si trova a una quota di 293 m s.l.m. e che la provincia di Macerata è considerata Zona II si ha che $q_{sk} = 0,85 \cdot [1 + (\frac{293}{481})^2] = 1,17$;
- C_E è il coefficiente di esposizione: si prende come riferimento il valore di una zona battuta dai venti, cioè $C_E = 0,9$;
- C_t è il coefficiente termico: la normativa impone il valore $C_t = 1$ quando non si hanno informazioni su come è fatta la copertura.

Zona II

Arezzo, Ascoli Piceno, Avellino, Bari, Barletta-Andria-Trani, Benevento, Campobasso, Chieti, Fermo, Ferrara, Firenze, Foggia, Frosinone, Genova, Gorizia, Imperia, Isernia, L'Aquila, La Spezia, Lucca, Macerata, Mantova, Massa Carrara, Padova, Perugia, Pescara, Pistoia, Prato, Rieti, Rovigo, Savona, Teramo, Trieste, Venezia, Verona:

$$\begin{array}{ll} q_{sk} = 1,00 \text{ kN/m}^2 & a_s \leq 200 \text{ m} \\ q_{sk} = 0,85 [1 + (a_s/481)^2] \text{ kN/m}^2 & a_s > 200 \text{ m} \end{array} \quad [3.4.4]$$

Figura 4.52 – Valori di riferimento del carico della neve al suolo, Circolare Ministeriale n° 7 del 2019 §4.3.2

Segue che il carico della neve è:

$$q_s = 0,8 \cdot 1,17 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,8424 \text{ kN/m}^2$$

Il modello è pronto per la fase successiva di analisi.

4.4 Fasi della realizzazione del modello diretto

Dato che la modellazione all'interno del software *Midas FEA* è risultata un po' ostica principalmente per la complessità degli ambienti interni da restituire, si è proceduto con un iter alternativo.

4.4.1 Importazione della Point Cloud in Autocad

La potenzialità del modello diretto è quella di poter creare i solidi direttamente da piante e sezioni: avendo a disposizione la *point cloud* queste informazioni sono immediate e ricavabili attraverso piani di taglio. Per questo motivo, attraverso il software *Recap* la nuvola è stata esportata in formato *PTS* e successivamente importata all'interno dell'ambiente di lavoro di *Autocad*. Essendo entrambi strumenti della famiglia *Autodesk*, supportano formati che consentono ai software di interagire facilmente tra di loro.

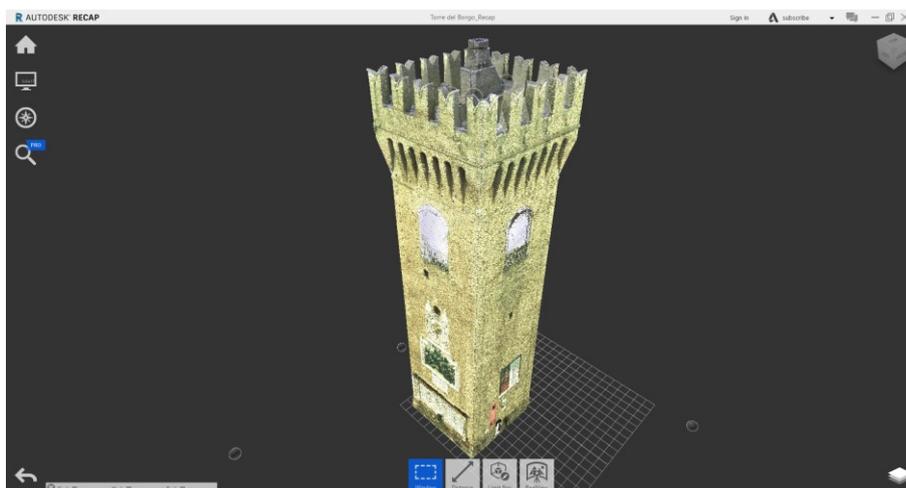


Figura 4.53 - Nuvola di punti nel software Recap

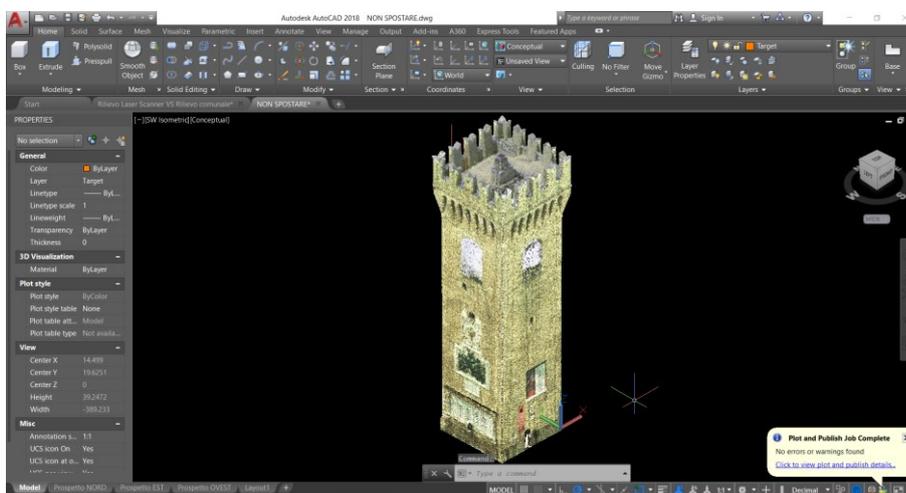


Figura 4.54 - Nuvola di punti importata in Autocad

4.4.2 Creazione del modello 3D in Autocad

Il modello è stato realizzato in *Autocad* con l'ausilio dei convenzionali strumenti di disegno 3D. Il solido è il risultato dell'estrusione dei vari elementi e di operazioni booleane di sottrazione e unione: sono state prese come riferimento le piante estratte dalla nuvola di punti per avere una configurazione il più possibile inerente alla realtà, ma al tempo stesso sono state valutate delle semplificazioni nelle forme che hanno permesso di superare l'interoperabilità tra ambienti di programmazione.

Infatti, spigoli molto sottili e piccole variazioni nelle sezioni modellati in *Autocad* generavano errori nella fase di creazione della *mesh* 3D.

Per questo motivo il solido è stato diviso in cinque pezzi per avere un maggiore controllo sul volume e operare modifiche locali piuttosto che globali.

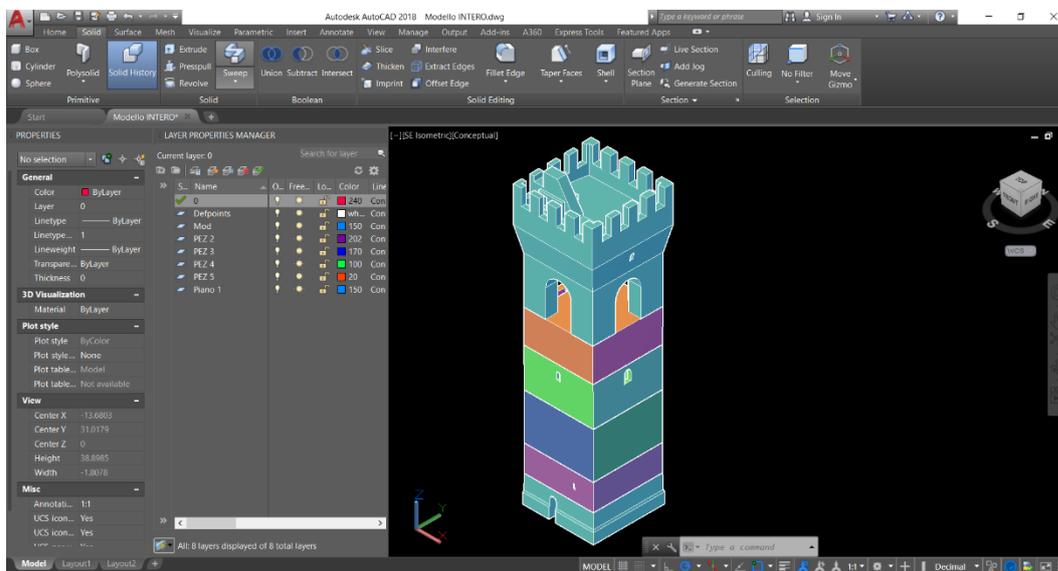


Figura 4.55 - Il solido modellato in *Autocad*

4.4.3 Conversione del modello in Inventor

Quando un modello 3D viene trasferito dal programma *CAD* nativo a un altro, le informazioni del modello solido possono restare invariate; tuttavia, durante il trasferimento può succedere che, a seconda del formato usato, alcuni elementi del progetto vadano persi.

Per questo motivo, quando si scambiano *file* tra sistemi diversi, si preferisce esportare i modelli in un formato neutro, non specifico di un particolare programma. I principali

formati con dati neutri non legati a specifici programmi sono: *STEP (Standard for the Exchange of Product model data)* e *IGES (Initial Graphics Exchange Specification)* e, in generale per produzioni in tecnologia additiva, *STL (stereolitografia)*.

Dal momento che Autocad può esportare solo in *IGES*, un primo tentativo di scambio tra software è stato effettuando con questo formato: l'operazione non è andata a buon fine, probabilmente perché è un output più adatto per le superfici e non per i solidi, come in questo caso.

Si è reso dunque necessario un passaggio ulteriore: il modello è stato importato in Inventor direttamente in *DWG (Drawing)* e poi esportato in *STEP*, anello di congiunzione tra *Autocad* e *Midas FEA*.

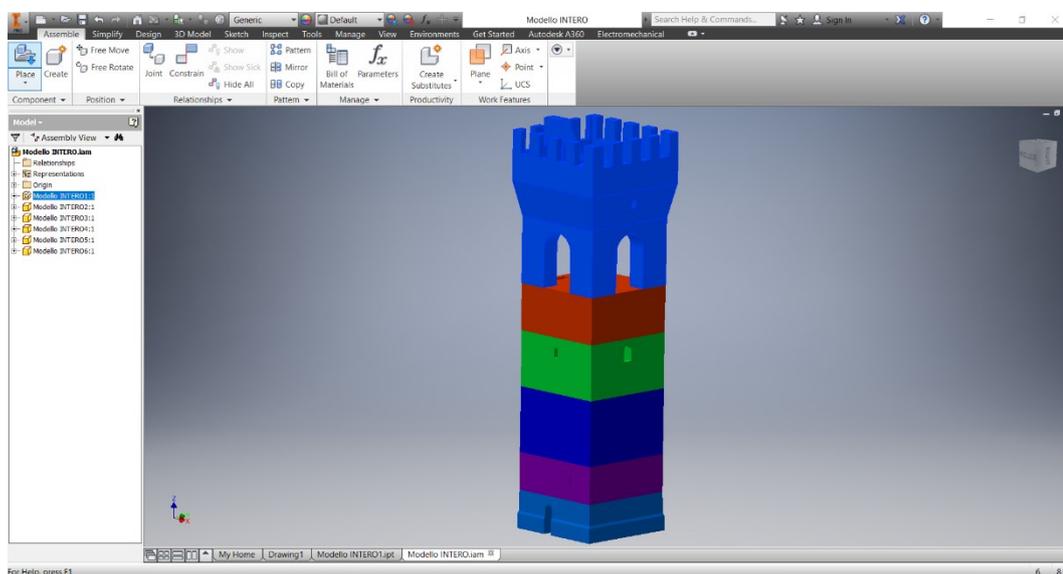


Figura 4.56 - Elaborazione finale in Inventor

4.4.4 Importazione in Midas FEA e creazione del modello a elementi finiti

Grazie al formato *STEP*, si è conclusa la fase di modellazione diretta e si può procedere con il workflow per la creazione del solido a elementi finiti.

Sono state eseguite tutte le operazioni già effettuate per il modello derivante dalla *point cloud* e riportate nel § 4.3.5.

4.5 Valutazioni qualitative e quantitative sui modelli

Per valutare l'accuratezza e la precisione di entrambi i modelli, è stato effettuato un confronto diretto con la nuvola di punti ottenuta dal rilievo. Questa comparazione è possibile grazie al *software Cloud Compare*: sovrapponendo la *point cloud* prima al modello diretto e poi a quello indiretto si hanno come risultato tutti gli scostamenti e le incongruenze, che, complessivamente, non hanno una grande specificità proprio perché si è cercato di tener fede, per quanto possibile, alla ricchezza del dato a disposizione. Di norma, infatti, la modellazione in Autocad segue procedure più spedite e quindi meno accurate.

I file importati sono:

- La nuvola di punti in formato binario *ASC*;
- Il modello indiretto in formato *STEP*;
- Il modello diretto in formato *STEP*.

4.5.1 Comparazione tra Point Cloud e modello indiretto

Importati i due oggetti, attraverso il comando *Cloud/Mesh Distance* è stato possibile definire la massima distanza dei punti dalla *mesh*, quale criterio per la comparazione (i punti della nuvola che si trovano a una misura superiore di quella impostata non vengono conteggiati).

È necessario specificare che il software prende come riferimento la *mesh* del modello e non la nuvola di punti: alla fine dell'operazione, infatti, si ha una rappresentazione grafica in cui alle varie parti della nuvola viene attribuito un colore in funzione dello scostamento. Il valore massimo considerato è di 50 centimetri: in verde sono rappresentate le distanze pressochè esigue o nulle, le tonalità rosse e blu indicano le distanze massime a seconda dell'orientamento in cui avviene lo scostamento e tutte le sfumature intermedie comprendono tutti i rilevamenti compresi nel range fissato inizialmente.

Come previsto, dalle viste assometriche si nota che c'è quasi una completa corrispondenza tra *point cloud* e modello indiretto, a eccezione di un piccolo elemento sommitale, omissso perché considerato irrilevante e infatti rappresentato in rosso.

Anche entrambe le sezioni sono denotate prevalentemente dal colore verde o da piccole sfumature gialle, a eccezione di qualche nicchia: probabilmente il trattamento dei dati ha

fatto sì che la superficie del modello risulti più levigata e che quindi non vengano riportate le asperità o le irregolarità dello stato di fatto.

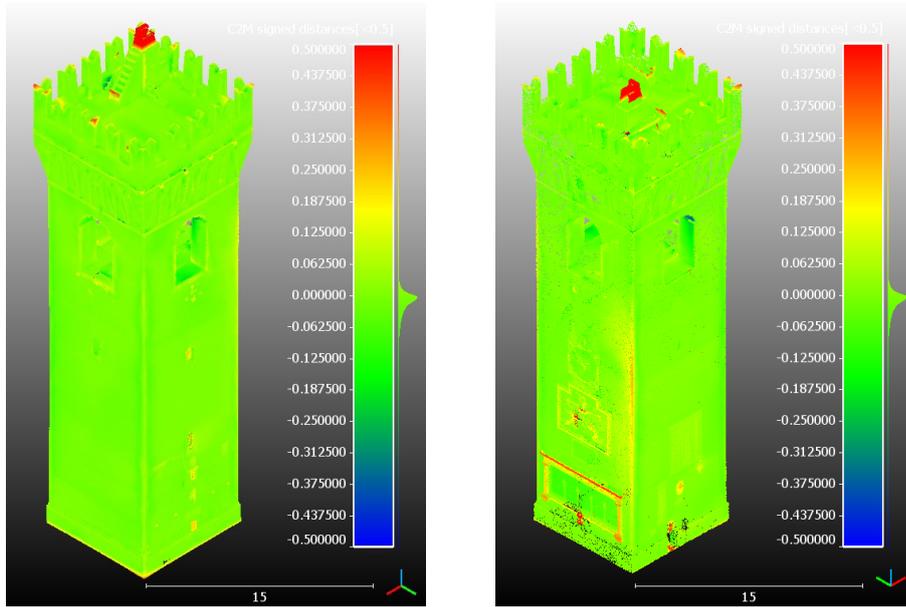


Figura 4.57 - A sinistra vista assonometrica Nord-Ovest, a destra vista Sud-Est

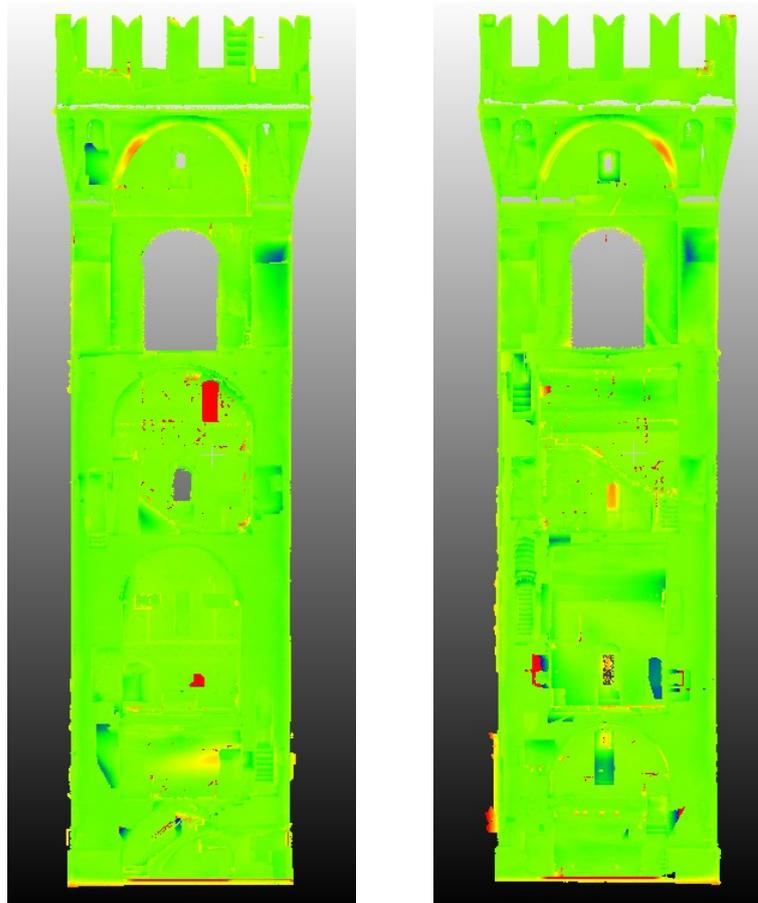


Figura 4.58 - A sinistra sezione Est-Ovest, a destra sezione Nord-Sud

In corrispondenza della cella campanaria si ha una piccola traslazione dei costoloni della volta a crociera: è stato osservato che fin dalla creazione della *mesh* in *Geomagic* questo particolare è stato approssimato e questa configurazione si è poi preservata in tutte le operazioni successive.

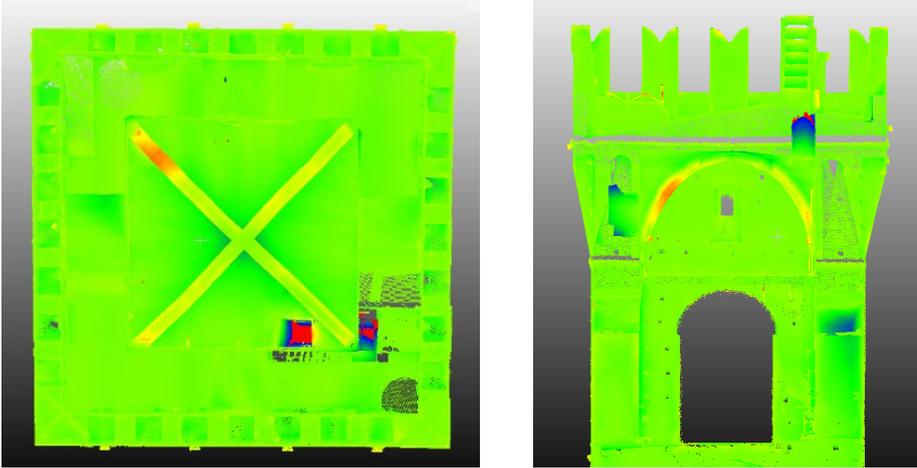


Figura 4.59 - Scostamento della volta a crociera nella cella campanaria

Altre notevoli incongruenze si hanno: nella pianta relativa al piano terra, poichè, nel *software* di analisi, era necessario vincolare direttamente le murature a terra con un incastro, e nella fascia dei merli e dei beccatelli, configurazioni che hanno richiesto maggiori accorgimenti nella fase di modellazione e che, a seguito di numerosi tentativi, rappresentano comunque il migliore risultato finale.

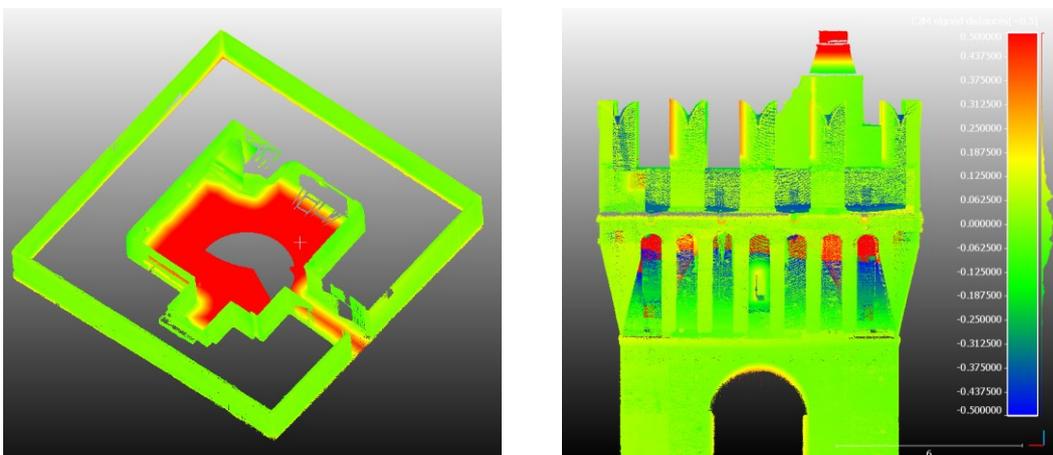


Figura 4.60 - A sinistra gli scostamenti del piano terra e a destra quelli nella fascia superiore

4.5.2 Comparazione tra Point Cloud e modello diretto

La comparazione tra nuvola di punti e modello diretto è stata effettuata con il comando *Cloud/Mesh Distance* all'interno del software *Cloud Compare*.

In questo caso, sono risultati scostamenti più evidenti dal momento che il solido è stato costruito a partire dagli elaborati ricavati dalla nuvola, ma al tempo si è resa necessaria la valutazione di alcune approssimazioni per non incorrere in errori nella fase di *meshatura* in *Midas*. I criteri per la valutazione sono mostrati nel § 4.5.1.

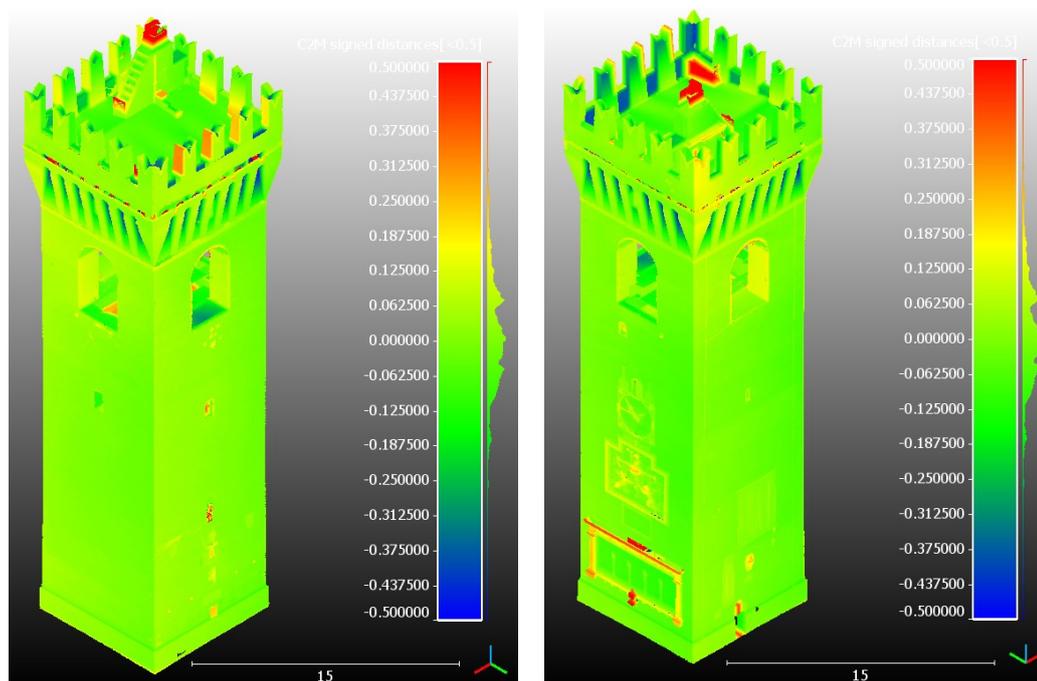


Figura 4.61 -A sinistra vista assonometrica Nord-Ovest, a destra vista Sud-Est

La vista assonometrica risulta più che soddisfacente poichè prevalgono scostamenti esigui, come si evince dalla colorazione giallo-verde.

Analizzando le sezioni si ha una maggiore consapevolezza di tutte le parti che non hanno una diretta corrispondenza: come già specificato, è stato deciso a monte della modellazione di operare delle semplificazioni, in particolare in corrispondenza delle nicchie, molte delle quali sono stati omesse, e dei collegamenti verticali, in cui le scale sono state rappresentate come rampe piuttosto che rappresentare i singoli scalini.

Tutte le volte a botte presentano dei piccoli spostamenti, seppur chiaramente segnalati, dovuti al fatto che la modellazione in Autocad ha realizzato superfici levigate, che non

riproducono le asperità della muratura che non sempre, nello stato di fatto, ha un andamento perfettamente ortogonale.

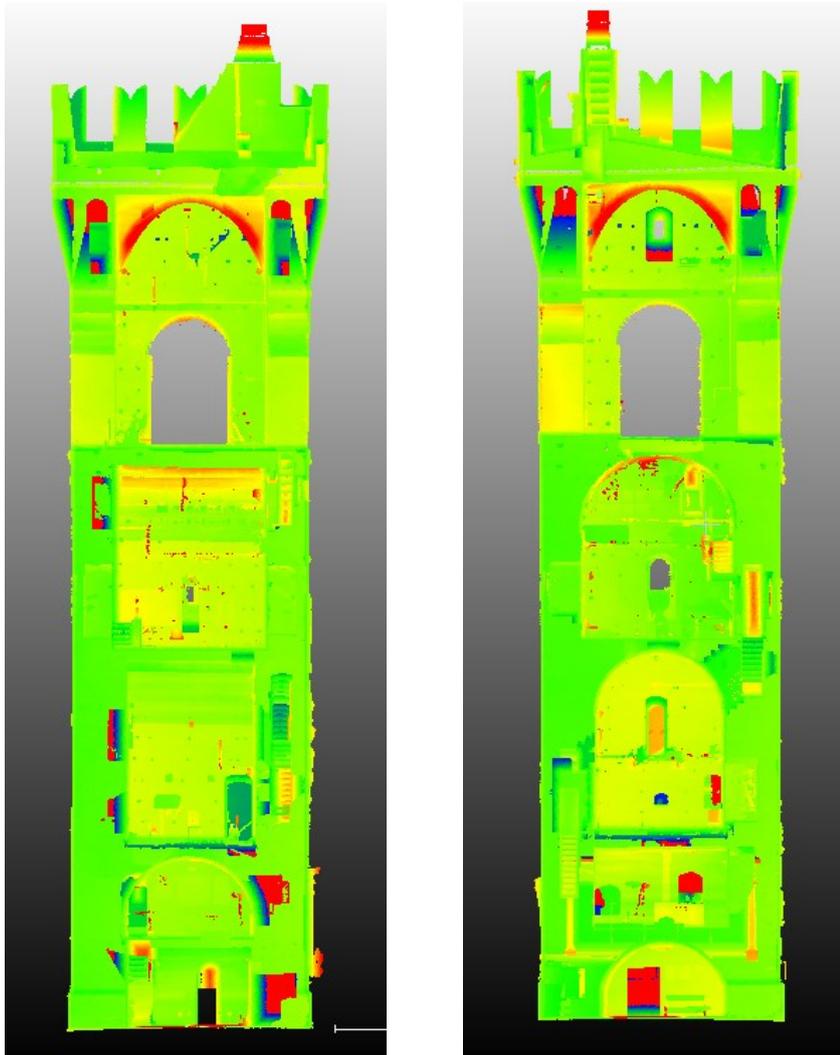


Figura 4.62 - A sinistra sezione Est-Ovest, a destra sezione Nord-Sud

A differenza del confronto precedenti, in questo caso, in corrispondenza della cella campanaria le incongruenze sono molto più degne di nota: in primis, i costoloni rappresentati nel modello sono visibilmente traslati rispetto a quelli della nuvola e si rilevano in generale piccoli scostamenti sull'orizzontamento della volta a crociera piuttosto che nelle pareti verticali che la sostengono, le quali sono svuotate da archi a tutto sesto che invece risultano quasi combacianti.

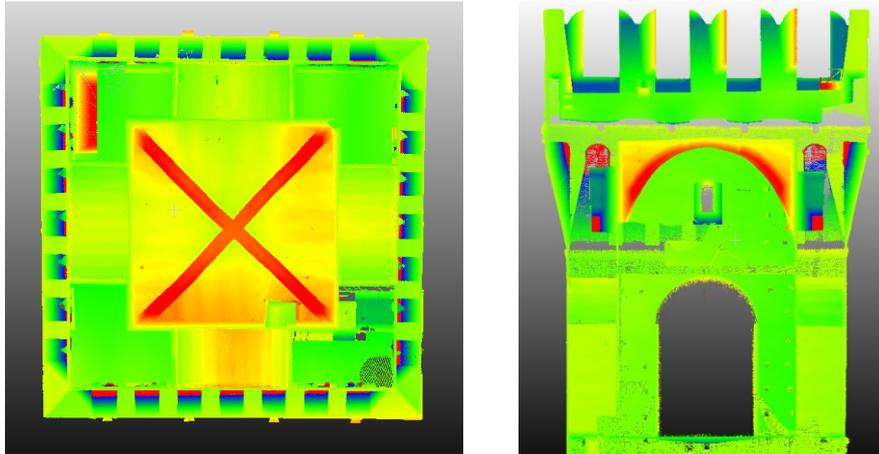


Figura 4.63 - Scostamento della volta a crociera nella cella campanaria

Si osserva che, nonostante la modellazione del solido in *Autocad* sia avvenuta incrociando costantemente piante orizzontali e sezioni verticali per un confronto, la quota del solaio del terzo piano è visibilmente traslata rispetto a quella della *point cloud*, risultato inatteso in virtù della scelta della procedimento adottato.

Al contrario, gli scostamenti in corrispondenza delle nicchie, come specificato in precedenza, erano previsti e comunque non costituiscono una mancanza in previsione dell'analisi strutturale.

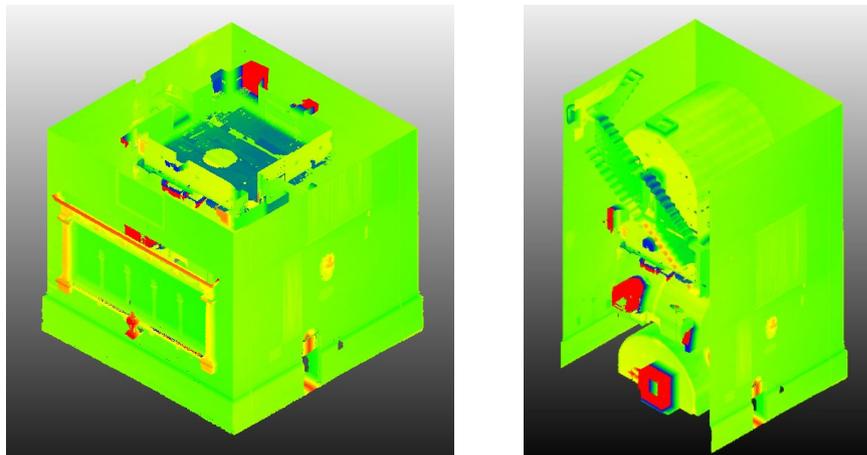


Figura 4.64 - Scostamenti in corrispondenza del terzo piano e delle nicchie

La parte sommitale è quella che risente maggiormente degli scostamenti: anche se in una prima fase erano stata modellata la fascia dei beccatelli, è stata in seguito eliminata poiché si creavano spigoli insidiosi che il software *Midas FEA* non riusciva a convertire in *mesh*.

La posizione dei merli risulta pressoché equivalente, ma sono ci sono lacune negli spessori che costituiscono un ulteriore risultato inatteso proprio a causa dell'accuratezza mostrata nella modellazione.

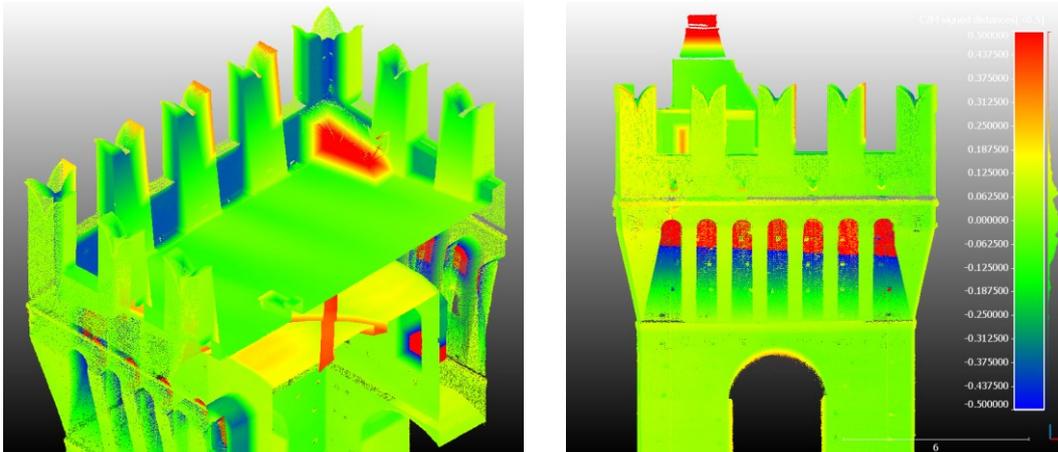


Figura 4.65 - Incongruenze nella parte sommitale della torre

4.5.3 Tempi computazionali

Una importante riflessione deve essere rivolta ai tempi computazioni per il trattamento dei dati e le elaborazioni dei modelli: la durata del *workflow* è principalmente funzione dell'interoperabilità tra *software*.

Il modello dalla nuvola è stato quello che ha richiesto il maggior numero di *step* intermedi prima di importare l'oggetto nel programma di calcolo, in quanto si è passati da una configurazione espressa in punti, a una *mesh*, a una *polisuperficie* fino ad arrivare a un solido vero e proprio. Oltre a ciò, anche all'interno di *Midas FEA* si sono verificati dei rallentamenti: per la creazione della *mesh* tridimensionale il *software* ha impiegato un arco temporale non indifferente (33 minuti per il primo pezzo in basso, 95 minuti per il secondo, 137 minuti per il terzo e 270 minuti per il quarto e ultimo pezzo), dovuto probabilmente al livello di dettaglio della Torre.

L'eliminazione degli elementi non strutturali dalla nuvola e le successive operazioni sulla *mesh* (riempimento delle parti mancanti, cancellazione degli elementi troppo piccoli, decimazione e levigatura) non sono state onerose, ma il modello finale prodotto in *Geomagic* produceva degli errori che impedivano il proseguimento agli *step* successivi.

Per questo motivo sono risultati decisivi i passaggi in *3D Reshaper* e in *Inventor*, nel primo caso per riparare la *mesh* e nel secondo per spezzare il solido in più pezzi in modo da alleggerire i tempi computazionali nel programma di calcolo.

Per quanto riguarda la realizzazione del modello diretto, si è proceduto utilizzando le piante e le sezioni derivanti dalla nuvola per ottenere un risultato il più possibile coerente con la realtà dello stato di fatto. Le principali differenze con l'oggetto precedente sono: l'utilizzo del software *Autocad* per la modellazione e la semplificazione di alcuni elementi. La prima scelta è motivata dal fatto che questo, essendo a tutti gli effetti un programma per il disegno tecnico e, per questo, essendo le sue capacità già note, ha permesso di eseguire la modellazione in tempi molto ragionevoli.

La valutazione di semplificare alcune forme è stata maturata in itinere, in quanto *Midas FEA* non riusciva a eseguire la *meshatura* di spigoli vivi o parti molto piccole, in cui si è incappati ricalcando l'andamento effettivo della configurazione interna della Torre.

Questa fase, che va dal trattamento dei dati della scansione alla realizzazione del modello agli elementi finiti, ha richiesto un tempo di lavorazione di circa *tre mesi*.

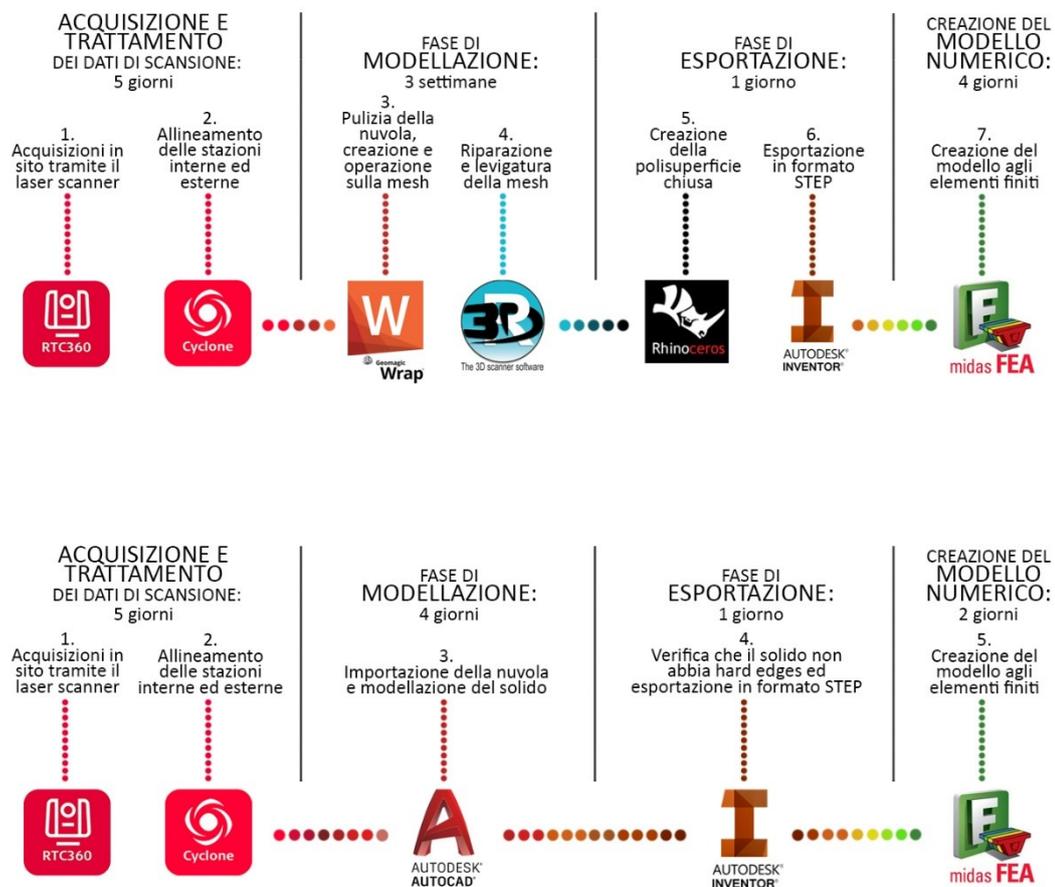


Figura 4.66- Confronto tra i workflow per la realizzazione dei modelli

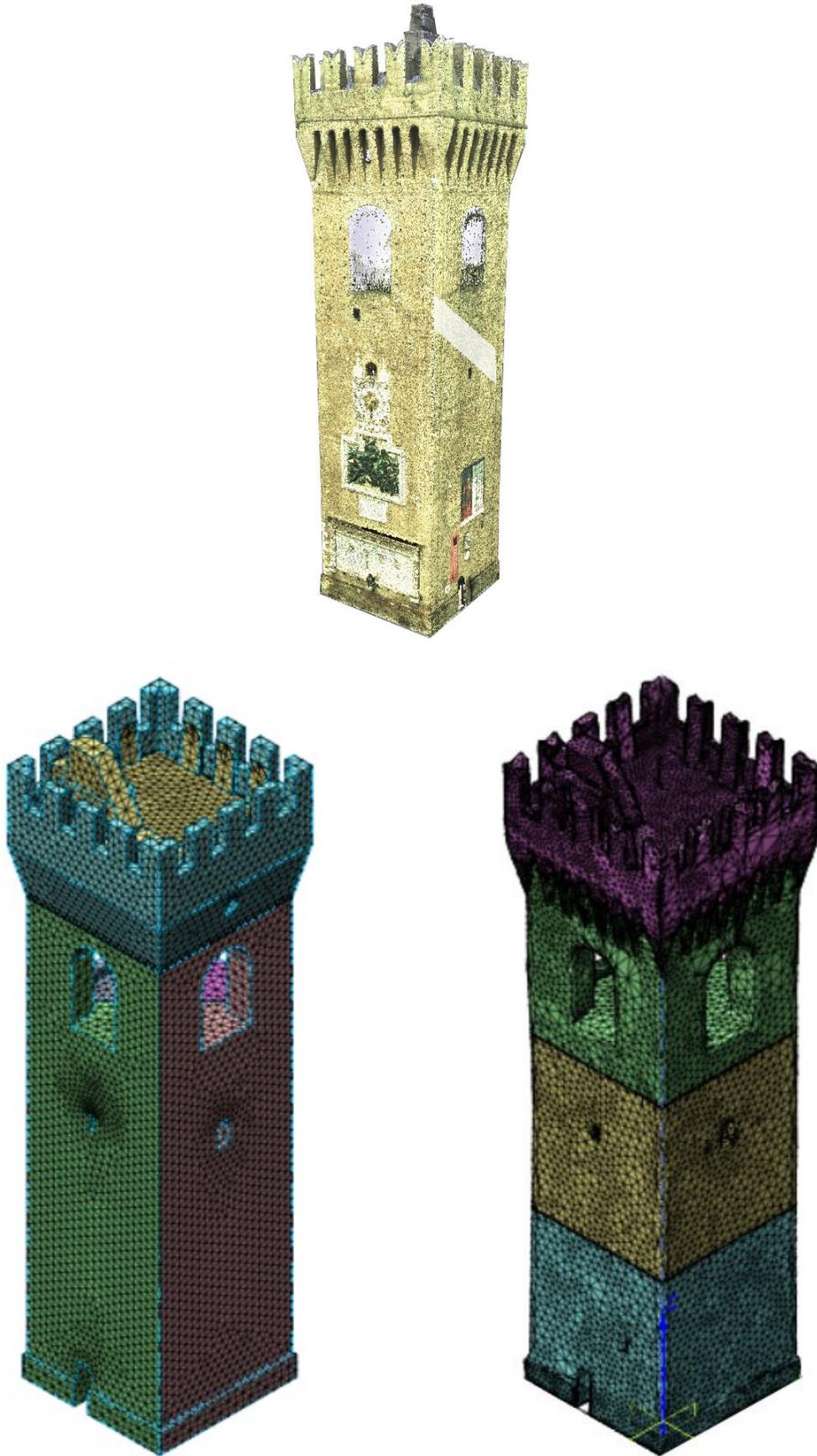


Figura 4.67 - Confronto tra i modelli finali: a sinistra quello diretto, a destra quello indiretto

5 Analisi strutturale

La modellazione è uno degli approcci più vantaggiosi per lo studio dell'andamento strutturale globale di un edificio in muratura.

Infatti, per affrontare i problemi fisici reali, che implicano complesse proprietà dei materiali, condizioni di carico e condizioni al contorno, si introducono ipotesi e idealizzazioni che li rendano matematicamente più facili, ma che comunque forniscono soluzioni sufficientemente approssimate e risultati abbastanza soddisfacenti dal punto di vista della sicurezza e dell'economia. Il legame tra il reale sistema fisico e la soluzione matematica è fornito dal *modello matematico*, che include tutte le ipotesi ritenute significative per il sistema reale (Bacchetto, 2016).

Ne risulta che questa è una fase

significativa per determinare il comportamento dinamico della Torre del Borgo e deve rappresentare adeguatamente le effettive distribuzioni di massa, rigidità e resistenza della costruzione stessa.

Può accadere che le proprietà dinamiche del modello differiscano da quelle della struttura originale: per questo motivo si procederà alla calibrazione, che farà sì che tali caratteristiche rispecchino il più possibile la realtà dello stato di fatto.

5.1 Analisi modale

L'analisi dinamica lineare, detta anche analisi dinamica modale, è stata condotta per valutare i principali modi di vibrare della struttura e per ottenere le masse modali, i cui valori devono essere confrontati con le disposizioni dettate dalla normativa, NTC 2018.

Con questo procedimento, si scompone una struttura caratterizzata da n gradi di libertà in un sistema equivalente formato da n oscillatori semplici a 1 grado di libertà: si ottiene, quindi, una semplificazione del calcolo ma al tempo stesso una valutazione globale dell'edificio.

L'analisi modale consiste nella soluzione delle equazioni di moto della costruzione, considerata elastica, in condizioni di oscillazioni libere, cioè in assenza di forze esterne, e nell'individuazione di particolari configurazioni deformate, che costituiscono i modi naturali di vibrare, nel caso studio, della Torre del Borgo.

Tali modi di vibrare appartengono alla struttura stessa: hanno un periodo proprio T , uno smorzamento convenzionale e una forma, come un oscillatore elementare, quale sistema dinamico a 1 grado di libertà.

Secondo quanto riportato nella *Circolare 617 del 2009* nella sezione *C7.3.3.1 – Analisi dinamica lineare*: “*Per poter cogliere con sufficiente approssimazione gli effetti dell’azione sismica sull’edificio, è opportuno considerare tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi con massa partecipante totale sia superiore all’85% della massa totale, trascurando i modi di vibrare meno significativi in termini di massa partecipante*”.

Dopo aver realizzato il modello geometrico e in seguito all’applicazione dei carichi descritti nel paragrafo § 4.3.6, è stata svolta l’analisi modale attraverso il software *Midas FEA*: il programma svolge un problema agli autovalori/autovettori e, dal momento che sono noti la geometria della struttura, le condizioni al contorno e le caratteristiche dei materiali sottoforma di matrici di massa, rigidezza e smorzamento, si ottengono i parametri modali del sistema, quali le frequenze modali, i fattori di smorzamento e le forme modali. In particolare, la massa modale partecipante è una caratteristica che si evince dalle forme modali e rappresenta la quota, e di conseguenza anche gli effetti, delle forze sismiche di trascinamento che il singolo modo è in grado di descrivere. Generalmente, i valori delle masse modali efficaci diminuiscono al crescere della cardinalità, dunque si è scelto di analizzare i primi 5 modi.

5.1.1 Modello dalla Nuvola

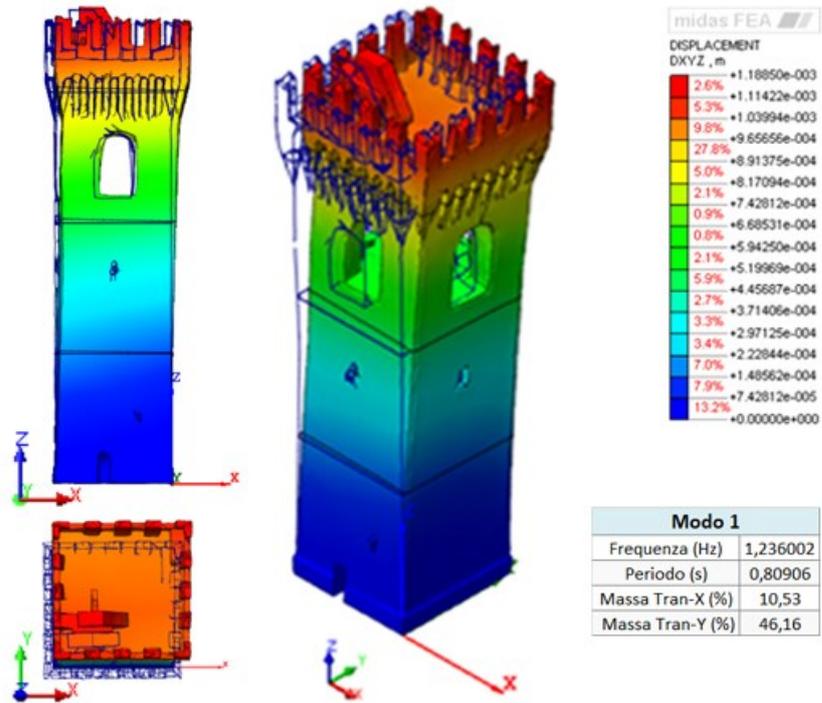


Figura 5.1 – Spostamenti e dati Modo 1 – Modello dalla Nuvola

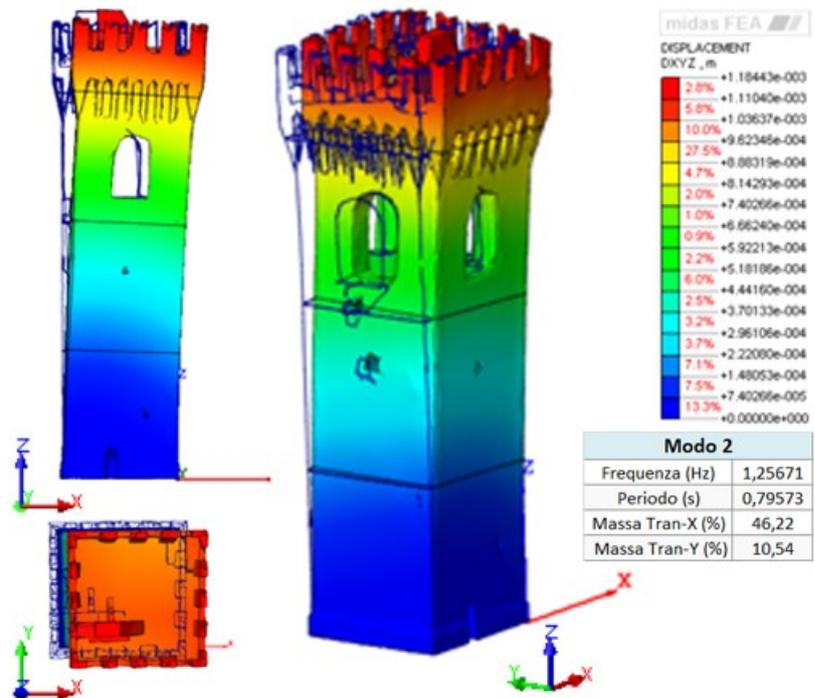


Figura 5.2 – Spostamenti e dati Modo 2 – Modello dalla Nuvola

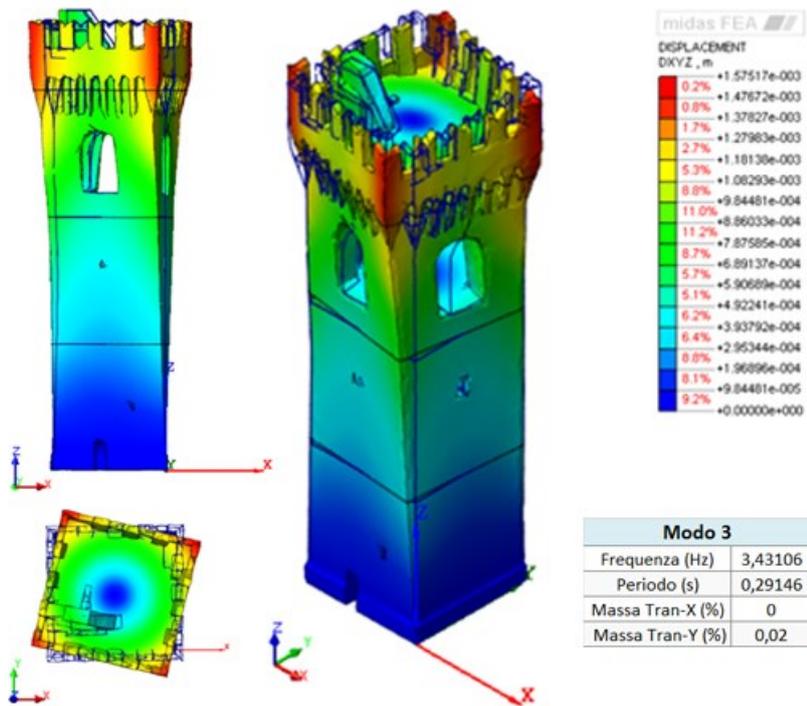


Figura 5.3 - Spostamenti e Modo 3 – Modello dalla Nuvola

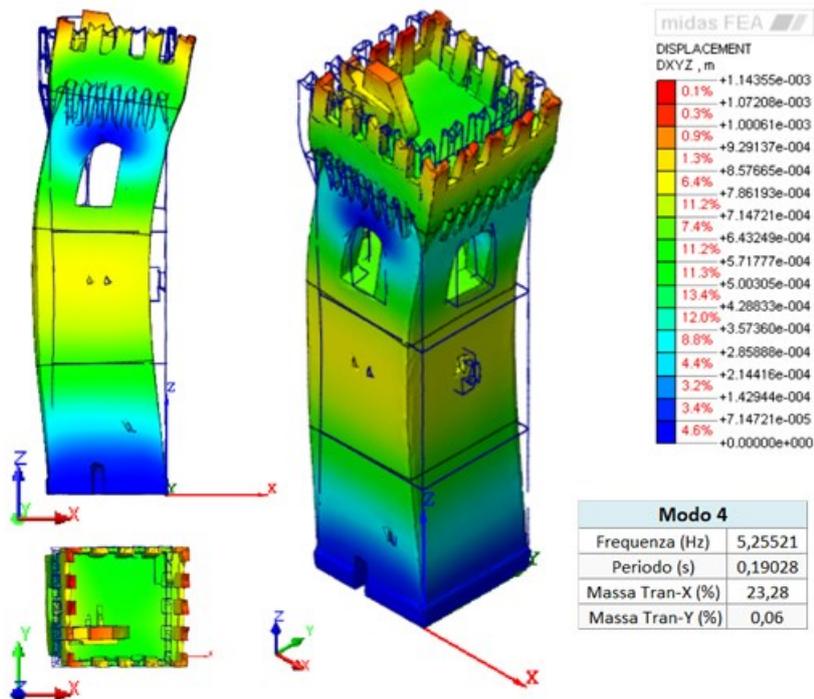


Figura 5.4 - Spostamenti e dati del Modo 4 – Modello dalla Nuvola

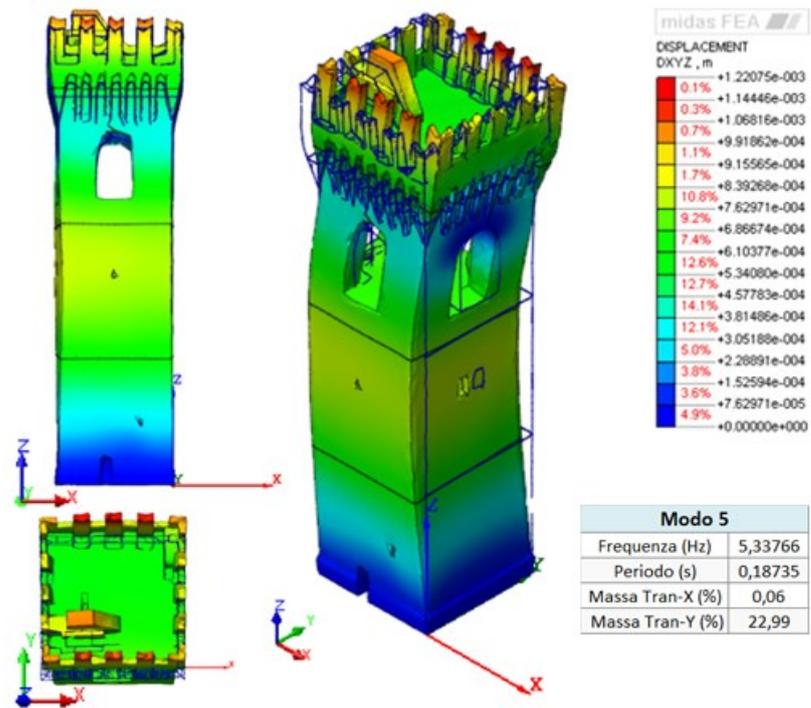


Figura 5.5 - Spostamenti e dati del Modo 5 – Modello dalla Nuvola

5.1.2 Modello da Autocad

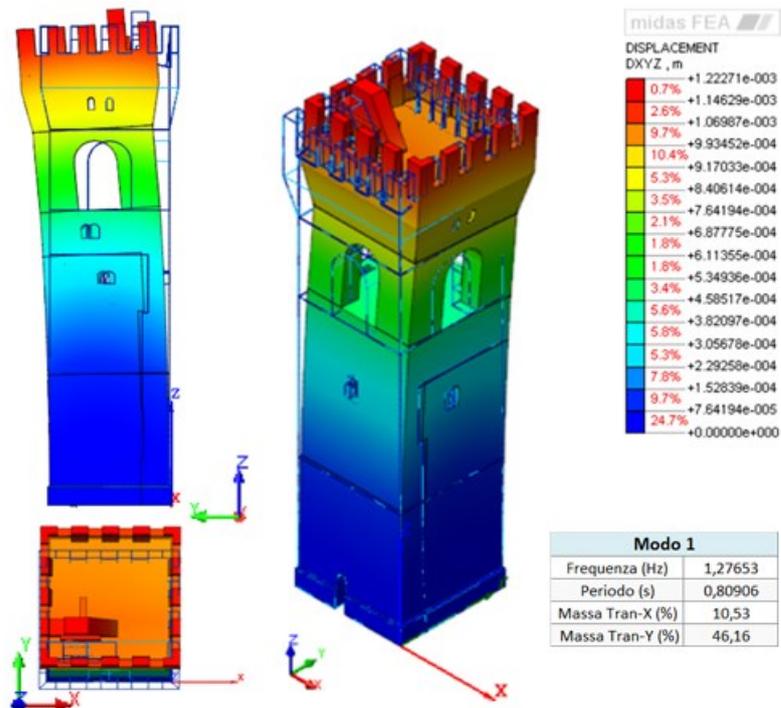


Figura 5.6 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello da Autocad

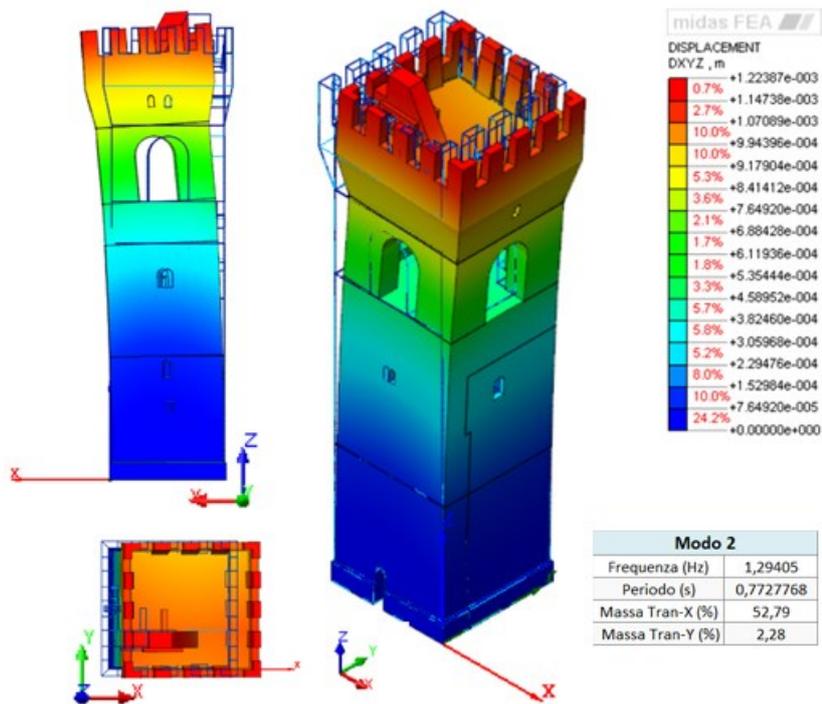


Figura 5.7 - Spostamenti e dato Modo 2 – Modello da Autocad

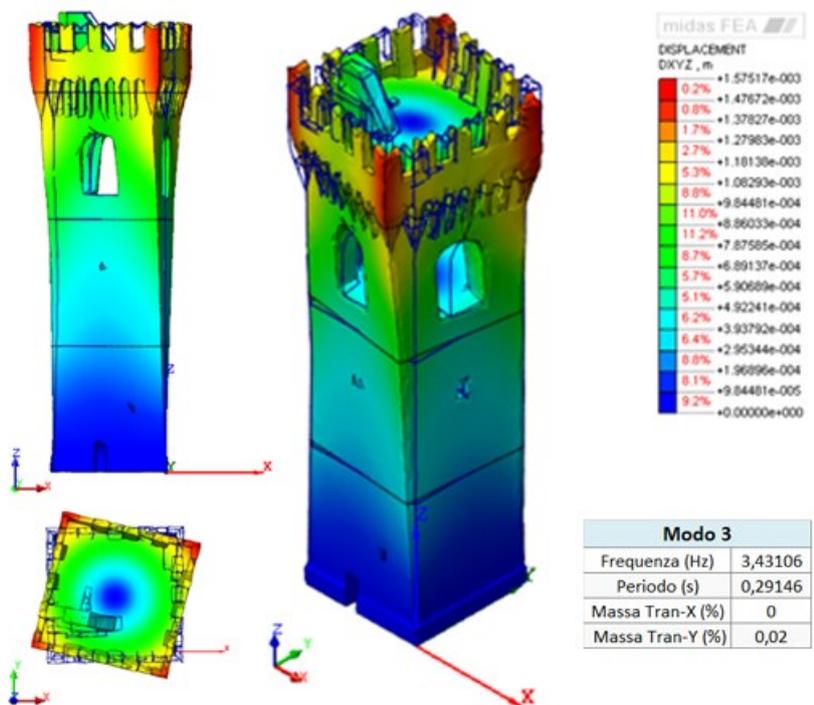


Figura 5.8 - Spostamenti e dati Modo 3 – Modello da Autocad

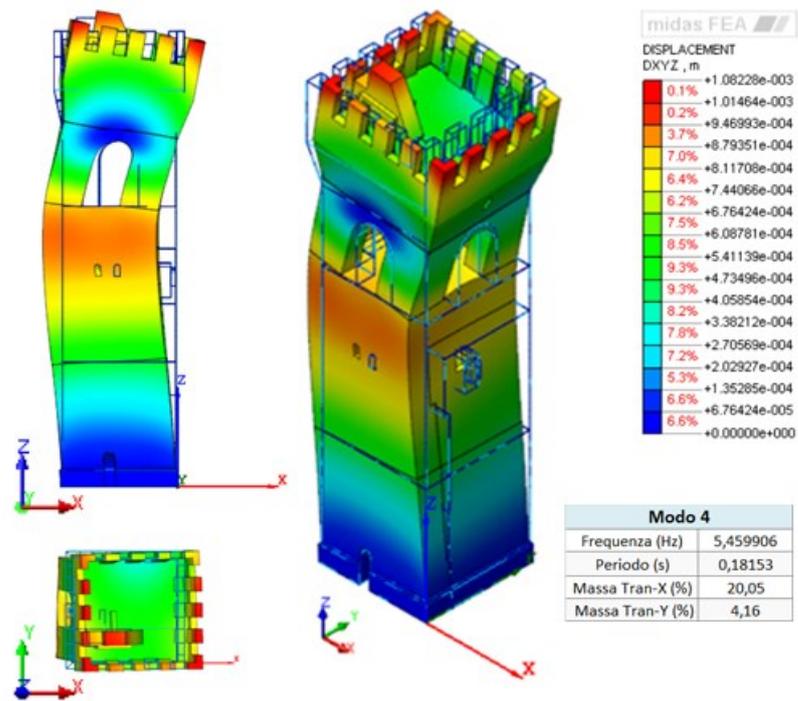


Figura 5.9 - Spostamenti e dato Modo 4 – Modello da Autocad

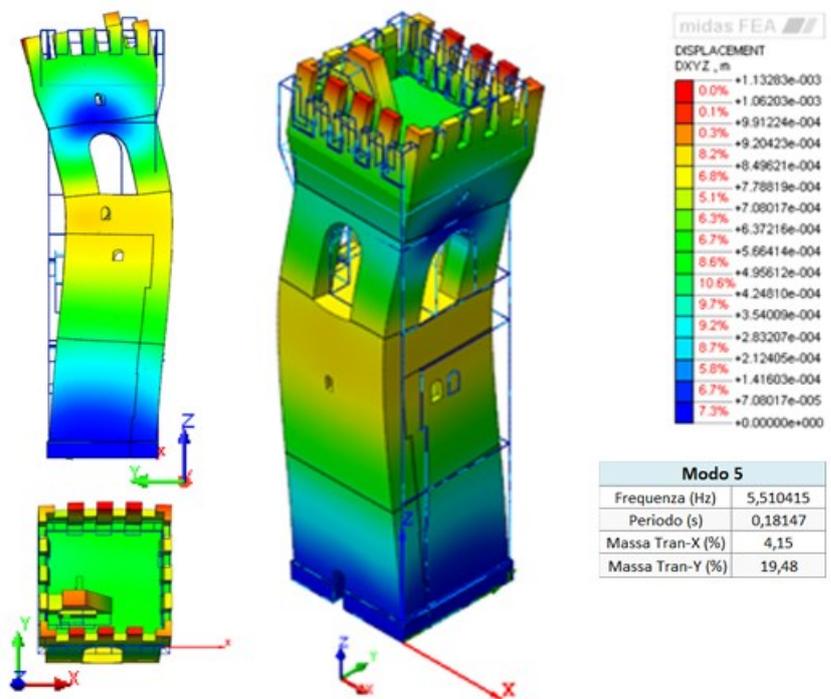


Figura 5.10 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello da Autocad

5.2 Operational Modal Analysis (OMA)

Con l'espressione *identificazione dinamica* di una struttura si intendono tutte quelle tecniche che consentono di individuare la risposta dinamica della struttura stessa, in termini di frequenze proprie, dei relativi modi di vibrazione e dei coefficienti di smorzamento. Due sono i possibili iter:

- Approccio analitico: nota la geometria della struttura, le condizioni al contorno e le caratteristiche dei materiali, la distribuzione di massa, rigidità e smorzamento è espressa tramite matrici, rispettivamente di massa, rigidità e smorzamento; da qui è possibile, risolvendo un problema agli autovalori, pervenire alla determinazione dei parametri modali del sistema (frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modali);
- Approccio sperimentale: a partire dalla misura dell'*input* dinamico sulla struttura e della risposta strutturale, si calcolano le funzioni di risposta in frequenza e si stimano, a partire da esse, i parametri dinamici della struttura.

Al primo ambito, quello analitico, appartiene l'analisi modale operativa (OMA), detta anche analisi modale di sola uscita o ancora analisi modale ambientale: grazie a questa tecnica si possono stimare gli stessi parametri modali (forma, frequenza e smorzamento) ottenuti mediante operazioni tradizionali, ma l'analisi viene condotta senza conoscere e/o controllare l'eccitazione di *input*.

Infatti, a differenza dell'analisi modale classica in cui si impone una sollecitazione nota al manufatto e se ne studia la risposta (analisi modale *input-output*), in questa tipologia l'*input* è incognito ed è rappresentato da rumori ambientali (vento, traffico veicolare oppure microtremori sismici), e l'indagine consiste nel rilevare la sola risposta dinamica della struttura all'eccitazione ambientale attraverso l'uso di accelerometri.

La teoria dell'analisi modale operativa è basata sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- Linearità: il comportamento dinamico della struttura è lineare, per cui la risposta a una certa combinazione di ingressi al sistema è uguale alla medesima combinazione delle relative risposte, quindi può essere applicato il principio di sovrapposizione degli effetti;

- Stazionarietà: le caratteristiche dinamiche della struttura non cambiano nel tempo, pertanto i coefficienti delle equazioni differenziali che reggono il problema sono costanti rispetto al tempo;
- Osservabilità: i dati necessari a determinare le caratteristiche dinamiche di interesse devono essere misurati, è dunque di notevole importanza scegliere in maniera oculata i punti di misura, evitando di disporre gli strumenti in quei punti, detti nodi modali, in cui l'osservabilità è nulla.

5.2.1 Strumentazione impiegata

La strumentazione utilizzata in questo caso studio è il *kit GEA*, composto dalle seguenti componenti:

- Sensori GEA II;
- SynkHUB;
- Cavi e connettori;
- Software GEA Lab.

Il sensore *GEA II* è un accelerometro triassiale, in grado di misurare l'accelerazione nelle tre dimensioni X, Y e Z. Rispetto alle tradizionali soluzioni di misurazione, il grande vantaggio di questa configurazione è che i sensori possono essere collegati direttamente a un terminale con il *software GEA Lab* installato, senza la necessità di schede di memoria dedicate.

Questo tipo di connettività aumenta il numero di elementi che possono essere collegati, consentendo così il perseguimento di un sistema di monitoraggio più efficace ed efficiente, in termini di misurazioni e anche costi.



Figura 5.11 - Sensore GEA II

Il *SynkHub* è un concentratore che funge da nodo di smistamento dei cavi che provengono dai diversi sensori e ha la funzione di sincronizzare gli stessi: questa caratterizzazione permette di superare l'inconveniente della lunghezza fisica dei cavi, che non si prestano a misurazioni di edifici complessi.

È possibile collegare al *SynkHub* fino a quattro sensori contemporaneamente per un totale di sedici sensori: in questo modo, si utilizzano cavi di lunghezze notevoli, che coprono un'area di raggio fino a 1 *kilometro*.

I dati provenienti dai sensori sono acquisiti e analizzati attraverso il *software GEA Lab*, il quale registra le storie temporali misurate.

GEAsensor II

SENSOR	
TYPE	HYBRID PIEZO-MEM
AXIS	3
FULL RANGE	8 g
NOISE DENSITY	1 ug/hz-2 @ 1 hz
CROSS AXIS SENSITIVITY	< 5%
SHOCK	3000 g
INTEGRATED DIGITIZER	
TYPE	SIGMADELTA
N° OF BITS	24
DYNAMIC RANGE	120 dB
SAMPLING FREQUENCY	1024 hz
CONSTRUCTION	
DIMENSIONS	Ø 110 X H 40 mm
CONSTRUCTION	ANODIZED AL
PROTECTION GRADE	IP68
OPERATING TEMPERATURE	-10 ÷ 75 °C
WEIGHT	500 g

SynkHub

SPECIFICATIONS	
POWER	MAIN / BATTERY (12 V)
DIMENSION:	110 X 170 X 30 mm
MAX SYNCH. ERROR	< 5 µS
CABLE LENGTH	UP TO 1 Km

Figura 5.12 - Caratteristiche del sistema GEA II

5.2.2 Layout dei sensori

Il monitoraggio della Torre del Borgo è stato effettuato il 7 Dicembre 2017 e sono stati impiegati cinque sensori per un totale di quattro misurazioni e due *Hub*, collegati al software *GEA Lab*. Per ciascuna, il tempo di acquisizione è stato pari a circa quaranta minuti e il *layout* dei dispositivi prevedeva di mantenere fissa la posizione di tre sensori (n° 9 e n° 10 a quota +32,37 metri; n° 7 a quota +22,06 metri) e di variare quella degli altri due (n° 6 a quota + 14,17 metri nella misurazione 4 e a quota +22,06 metri nelle misurazioni 1, 2 e 3; n° 8 a quota +6,81 metri nelle misurazioni 3 e 4 e a quota +14,17 metri nelle misurazioni 1 e 2).

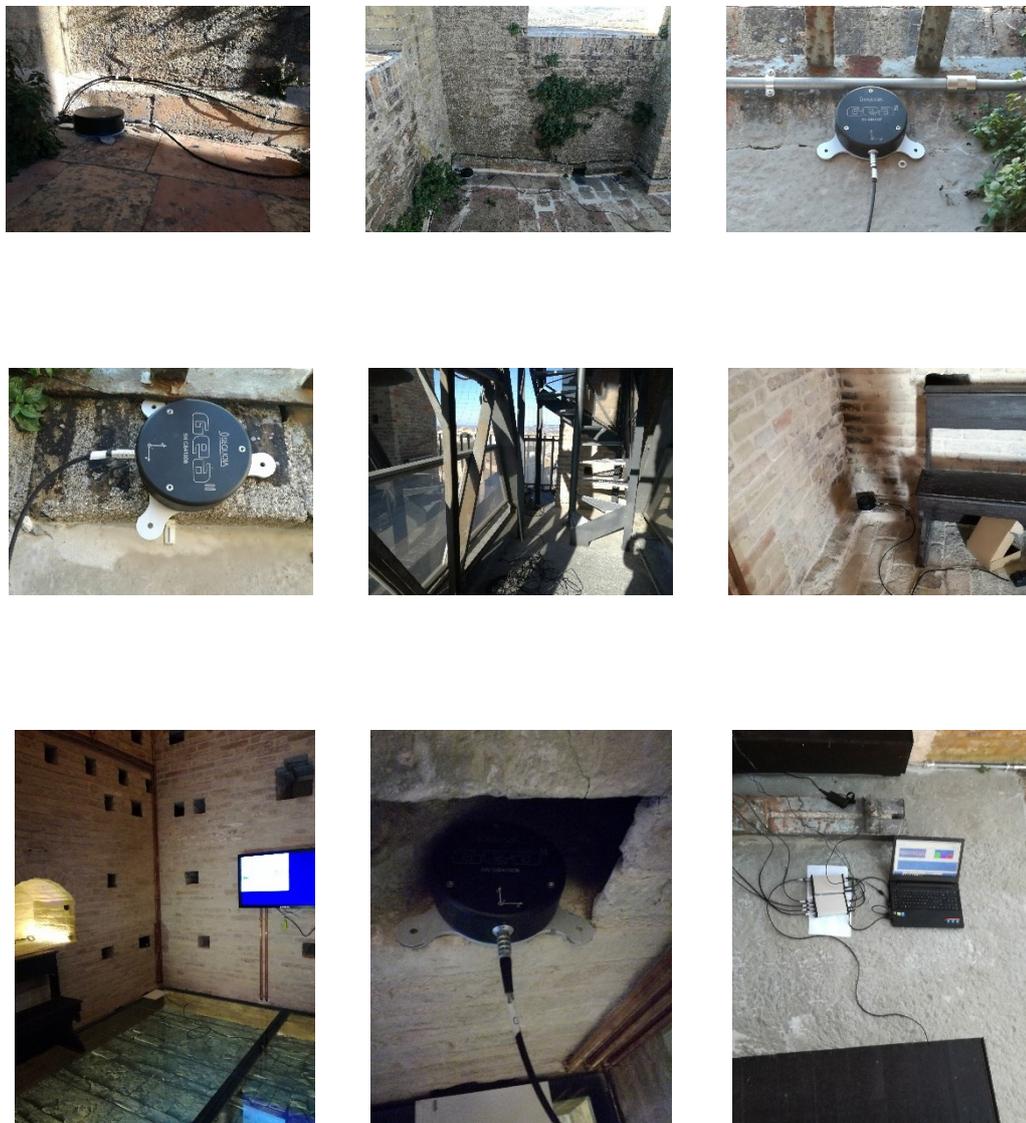


Figura 5.13 - Posizione dei sensori durante il monitoraggio



Figura 5.14 - Layout dei sensori in ogni misurazione

5.2.3 Processo di identificazione dinamica

I dati misurati in sito dopo l'acquisizione attraverso il software *GEA Lab*, sono stati analizzati ed elaborati attraverso un altro software dedicato all'analisi modale operativa, quale *ARTEMIS Modal, Structural Vibration Solution*.

L'obiettivo è quello di ricavare le diverse frequenze proprie di vibrazione dell'edificio e le relative forme modali associate.

La prima fase consiste nella creazione della geometria: piuttosto che realizzare un unico solido è stato definito un insieme di punti, uniti poi da linee orizzontali e verticali le quali a loro volta hanno definito le superfici.

Non è richiesta l'inserimento degli spessori delle pareti o le caratteristiche dei materiali poiché questa configurazione semplificata deve indicare la posizione degli accelerometri, i quali vengono assegnati ai nodi della geometria in modo da essere inseriti nella posizione corrispondente a quella reale in sede di monitoraggio.

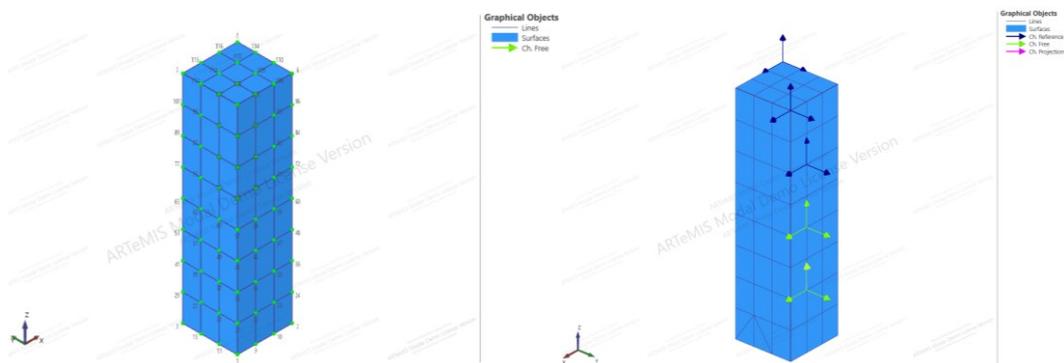


Figura 5.15 – Geometria iniziale semplificata e posizionamento dei sensori

Una volta pronto il modello e scaricate le registrazioni di ciascun sensore può avere inizio l'esecuzione dell'analisi modale.

La frequenza di campionamento, quale numero di volte al secondo in cui un segnale analogico viene misurato e memorizzato in forma digitale, è pari a 1024 Hz mentre la frequenza di *Nyquist*, quale minima frequenza necessaria per campionare un segnale analogico senza perdere informazioni, è di 512 Hz .

È importante che le vibrazioni da rumore bianco siano le uniche a sollecitare l'edificio durante il monitoraggio, dunque si può intervenire agendo sulle storie temporali delle accelerazioni misurate per isolare solo questo tipo di vibrazioni.

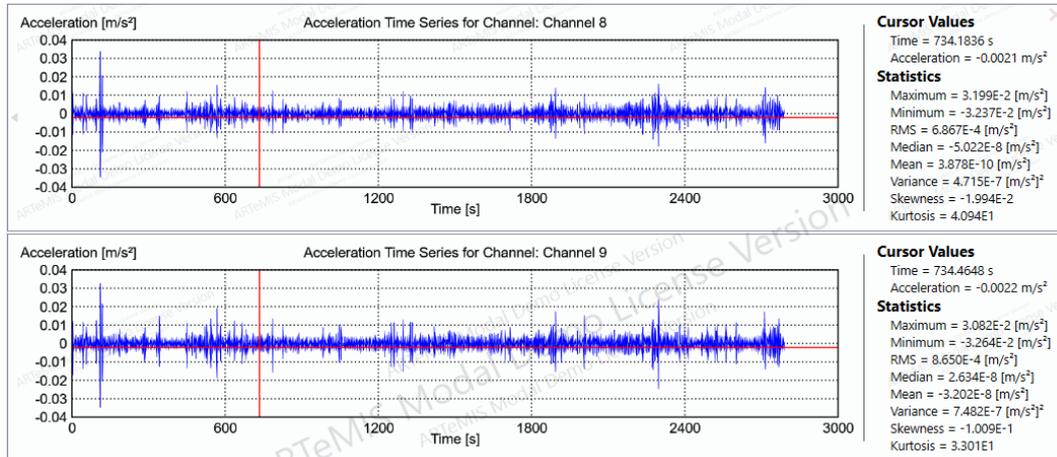


Figura 5.16 – Time histories delle accelerazioni misurate dai canali 8 e 9 nella misurazione 1

È stata eseguita una decimazione del segnale nel range 0 – 17,1 Hz, cioè quello compatibile con l'ordine di grandezza delle reali frequenze della Torre.

In riferimento al nuovo intervallo, il programma restituisce come output i diagrammi di densità spettrale, i quali forniscono per ogni frequenza tanti valori quanti sono i canali di misura.

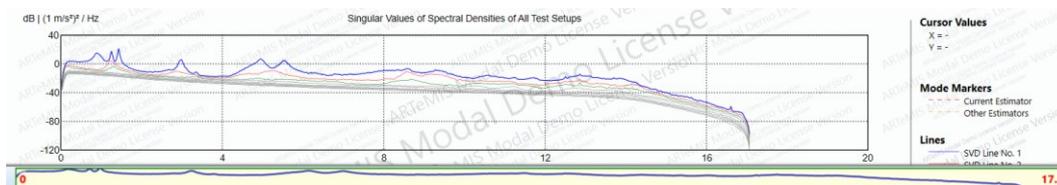


Figura 5.17 - Diagramma delle singole densità spettrali

A partire da ciascun diagramma, ricavato per ogni misura, segue la stima delle frequenze, effettuata ancora una volta da ARTeMIS sulla base di due principali tipologie di analisi.

La prima è *FDD Frequency Domain Decomposition*: individua, in corrispondenza dei picchi, le frequenze dei modi principali.

Questo metodo si fonda sull'asserzione che gli autovettori, che rappresentano i modi di vibrare, costituiscano una base, essendo linearmente indipendenti, e quindi qualsiasi spostamento del sistema può essere rappresentato da una loro combinazione lineare. È possibile, dunque, disaccoppiare le componenti dei vari modi.

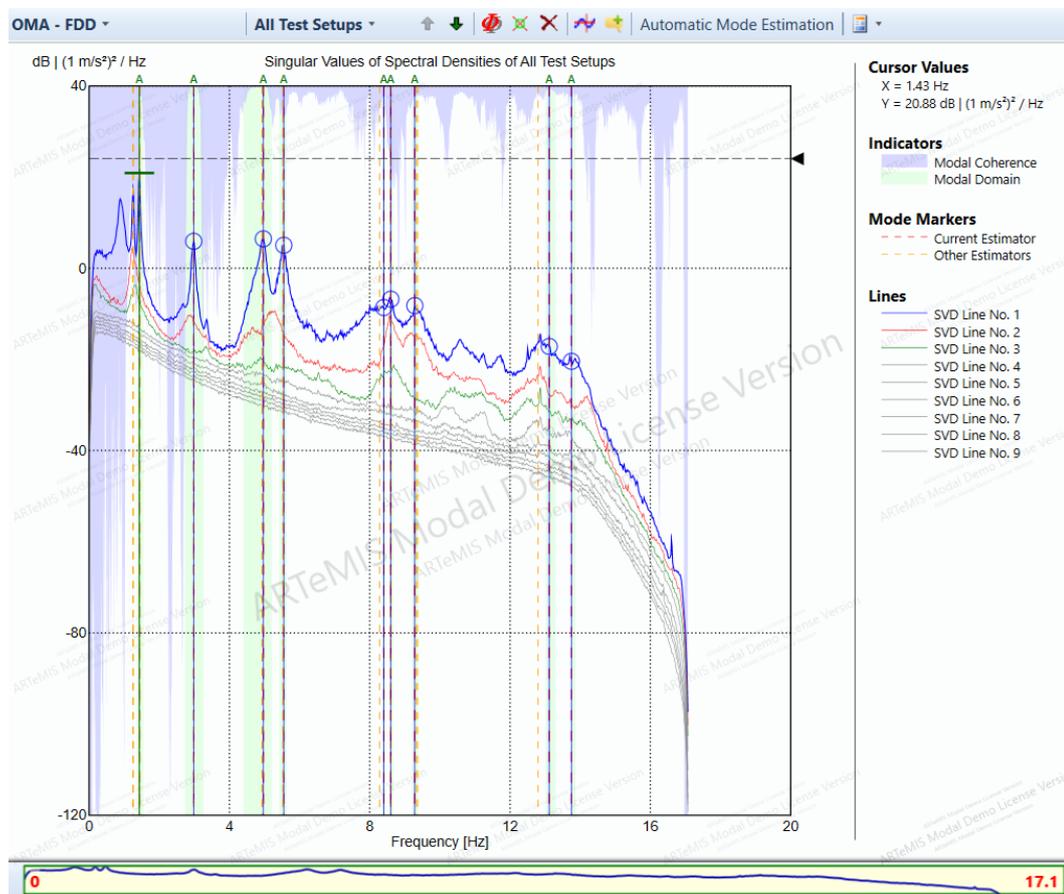


Figura 5.18 - Interfaccia del grafico di stima delle frequenze con analisi OMA-FDD

La seconda è *SSI Stochastic Subspace Identification*, che effettua una analisi nel dominio del tempo: è più precisa in quanto consente di individuare, attraverso il diagramma di stabilità, i modi più stabili, cioè quelli meno influenzati dai rumori ambientali che sono fonte di disturbo.

Nell'interfaccia del grafico a essa associato, la stabilità si configura nell'allineamento dei puntini rossi: più questi sono allineati più il modo si definisce stabile.

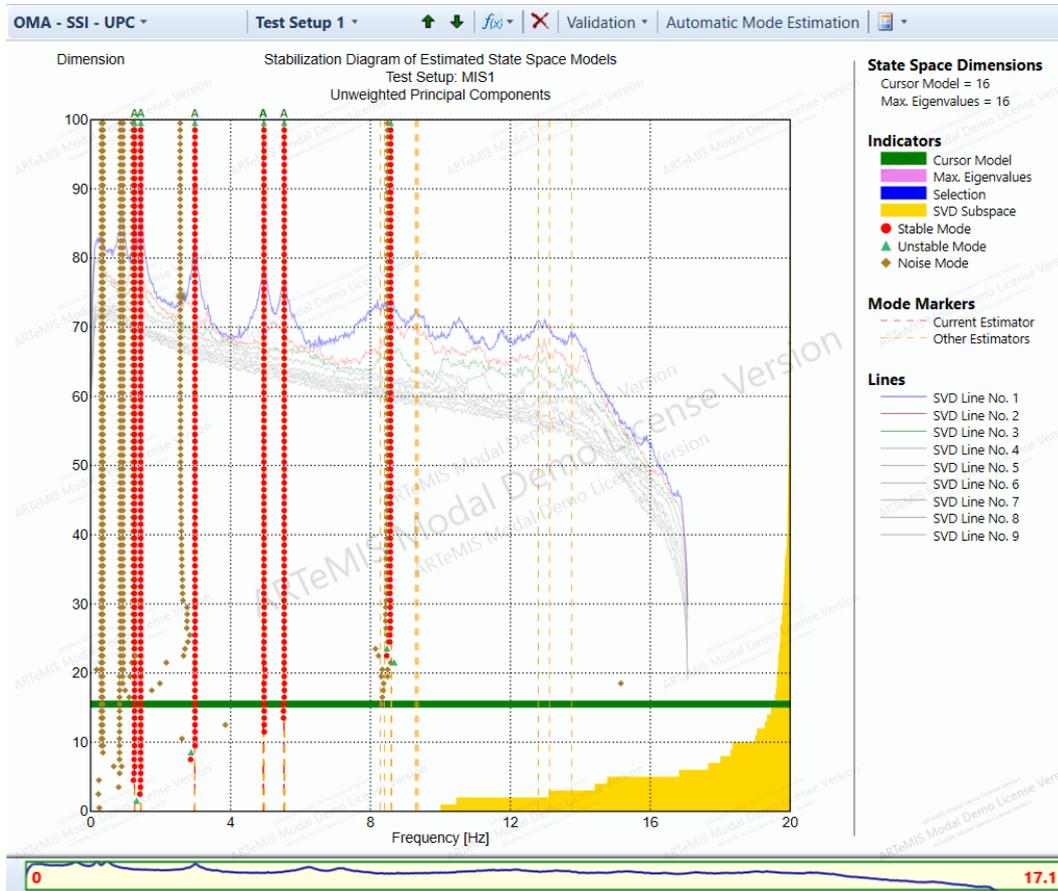


Figura 5.19 – Interfaccia del grafico della stima delle frequenze con analisi OMA-SSI

Tra i modi individuati con i differenti metodi di stima, quelli presi in considerazione per il successivo processo di calibrazione del modello numerico sono quelli risultanti dall'analisi SSI-CVA. L'affidabilità della scelta è stata valutata osservando l'andamento degli istogrammi MAC (*Modal Assurance Criterion*) e da quello dei *complexity plot*.

Per il primo, la situazione ottimale è avere, graficamente, un'unica diagonale. Il secondo esprime la complessità dei modi: più un modo è complesso minore è la sua attendibilità; più è attendibile e più le frecce si assestano su una linea orizzontale.

Frequency [Hz]	Std. Frequency [Hz]	Damping [%]	Std. Damping [%]	Complexity [%]	Std. Complexity [%]
SS1 - CVA					
1.253	N/A	1.51	N/A	0.054	N/A
1.432	N/A	0.942	N/A	0.064	N/A
2.985	N/A	1.156	N/A	0.085	N/A
4.938	N/A	1.411	N/A	0.222	N/A
5.535	N/A	1.549	N/A	1.034	N/A

Figura 5.20 - Frequenze SSI – CVA

Si osserva, comunque, che le frequenze ricavate con i precedenti metodi di stima sono tutte numericamente vicine tra loro.

Dall'analisi modale sperimentale sono stati scelti i primi 5 modi propri e si riportano di seguito le deformate e le relative frequenze associate, selezionate poi per il successivo processo di calibrazione.

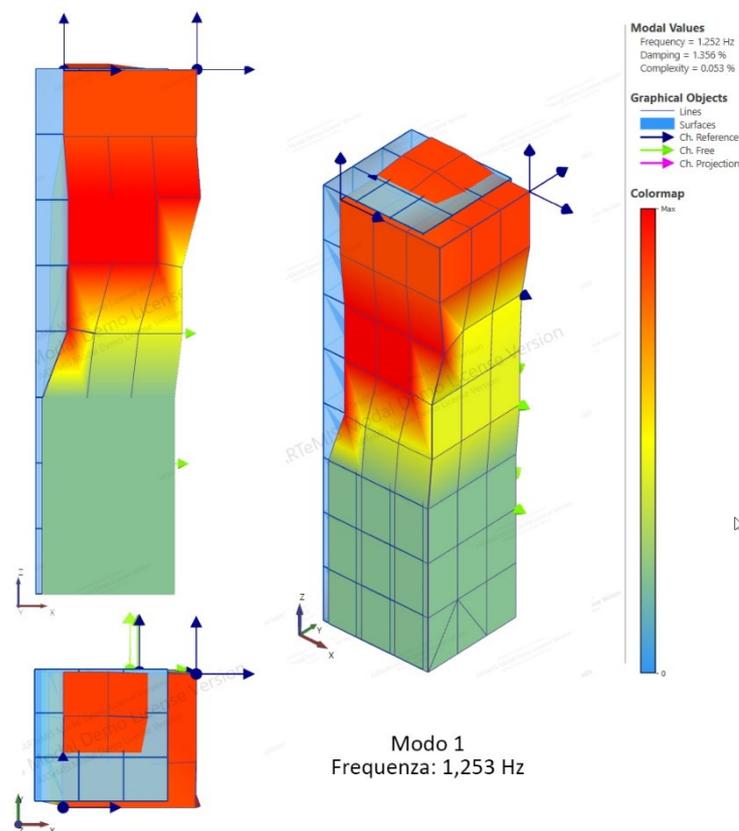


Figura 5.21 – Modello sperimentale, Modo 1

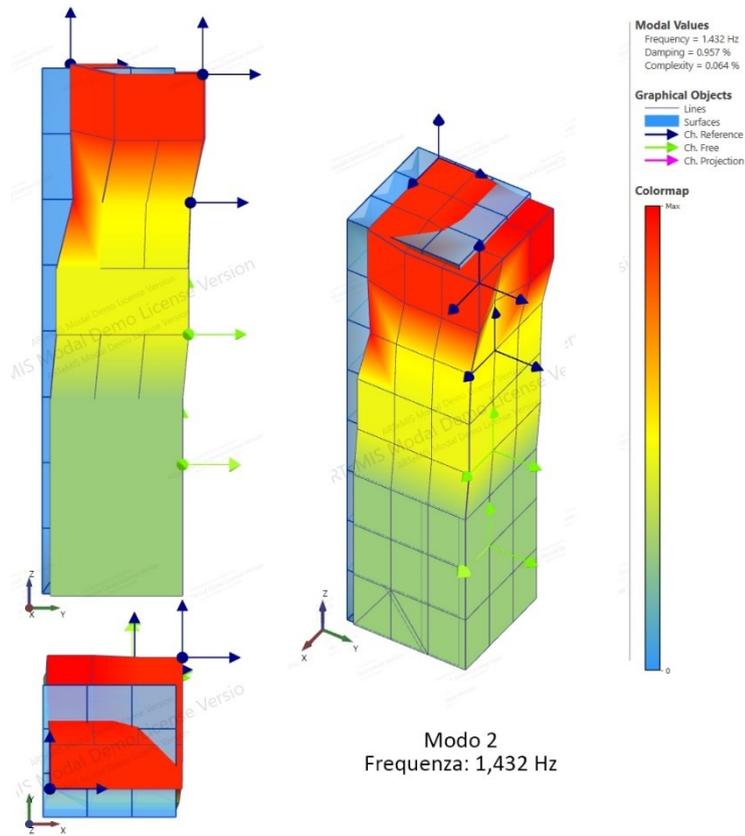


Figura 5.22 – Modello sperimentale, Modo 2

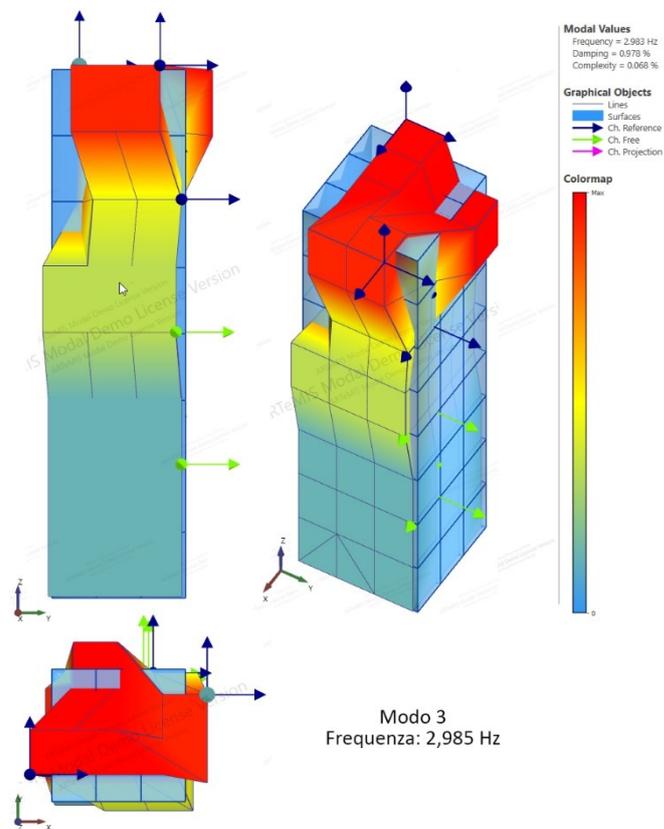


Figura 5.23 – Modello sperimentale, Modo 3

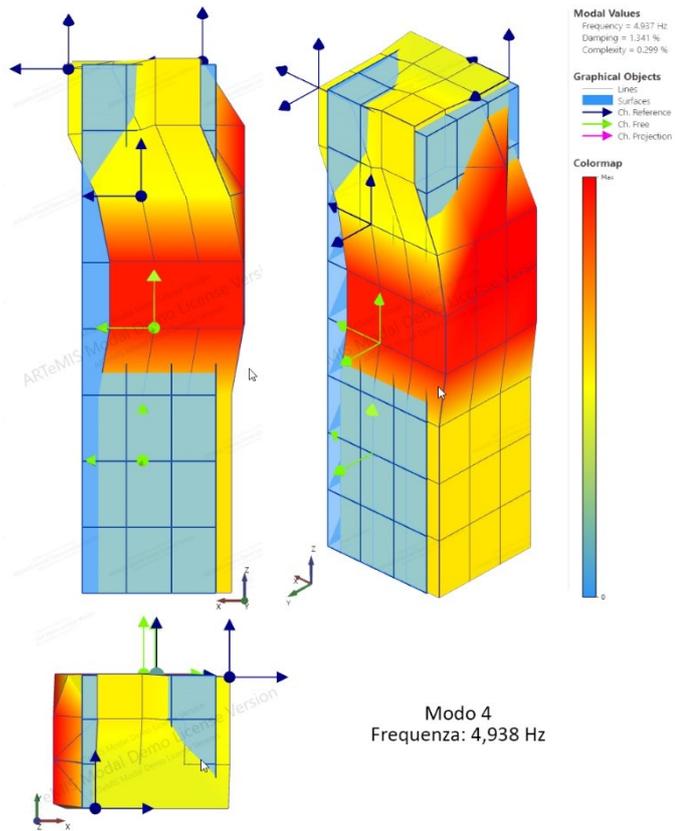


Figura 5.24 – Modello sperimentale, Modo 4

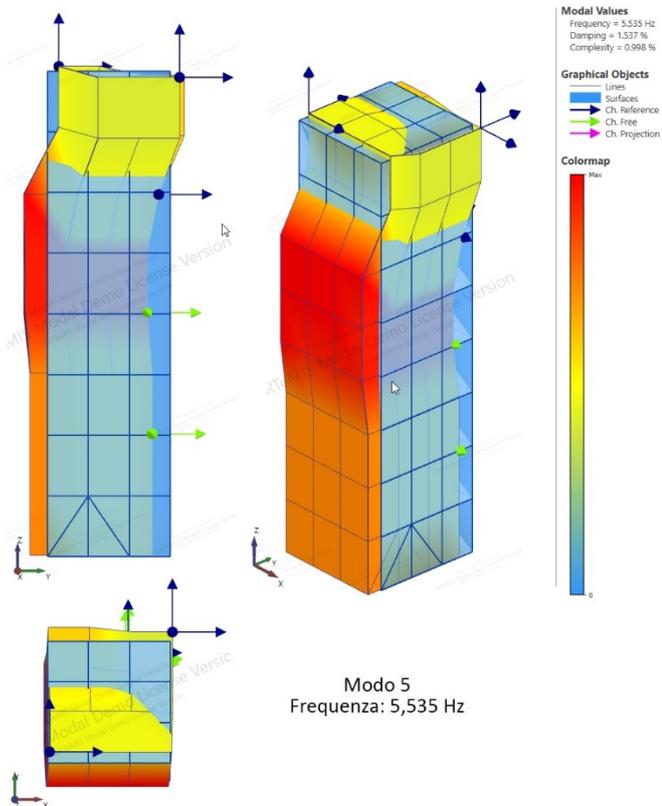


Figura 5.25 - Modello sperimentale, Modo 5

5.3 Calibrazione dei modelli

I modelli numerici, descritti nei §5.1.1 e §5.1.2, sono stati calibrati sulla base dei risultati dell'analisi modale sperimentale.

La procedura di *modal updating* (Isidori, Perdicca, Concettoni, Clementi, & Lenci, 2015) è stata effettuata con un metodo di tipo indiretto, modificando le proprietà meccaniche della muratura, quali il modulo elastico E e la densità ρ , a partire dalle indicazioni della tabella C8.5.I nel paragrafo §C8.5.3.1 della *Circolare Ministeriale n°7 del 2019* in cui vengono riportati i valori di riferimento per ogni tipo di paramento murario.

Il cambiamento di E e ρ è stato eseguito per iterazione e i risultati ottenuti, passo dopo passo, sono stati confrontati con le frequenze ed è stato controllato che la massa partecipante a ogni modo sia superiore al 5%, come da normativa, con l'obiettivo di far coincidere le frequenze del modello numerico con quelle sperimentali.

L'analisi è stata condotta in termini di differenze tra i valori analitici e sperimentali delle frequenze dei modi di vibrare:

$$\Delta f [\%] = \left| \frac{f_{exp} - f_{nm}}{f_{exp}} \right| \cdot 100$$

- f_{exp} è il valore della frequenza del modello sperimentale;
- f_{nm} è il valore della frequenza del modello numerico.

5.3.1 Calibrazione del modello dalla Nuvola

Come già specificato nel §4.4.4, la Torre del Borgo è stata caratterizzata da un unico materiale, quale la muratura di mattoni pieni e malta di calce, con proprietà meccaniche $E=1800 \text{ N/mm}^2$ e $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$, valori indicati nella normativa *NTC18*.

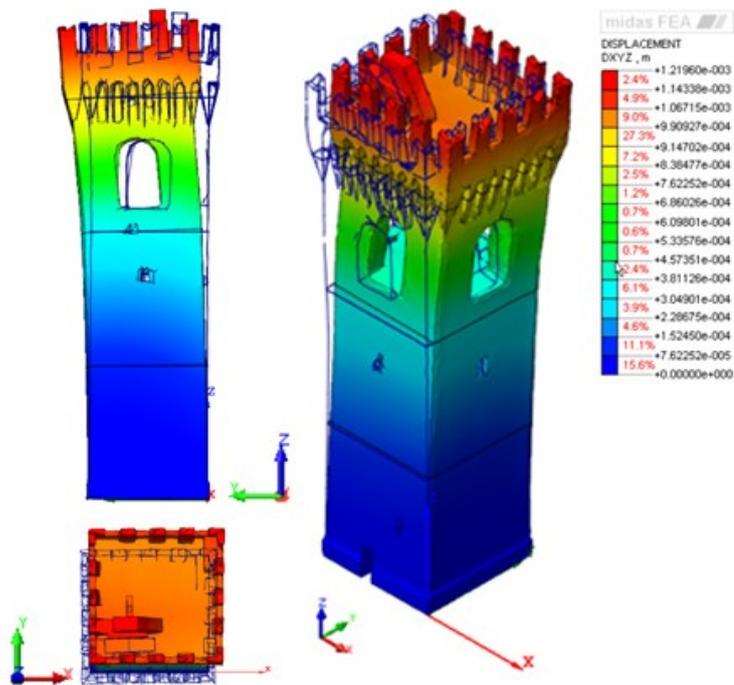
L'elevazione è stata sezionata orizzontalmente in quattro parti per agire localmente e per evitare che manovre specifiche, se applicate globalmente, potessero modificare il comportamento dell'intera Torre.

Valori sempre più vicini a quelli del modello sperimentale sono stati individuati aumentando, con gradi diversi, il modulo di elasticità in corrispondenza di tutte le parti, a eccezione di quella corrispondente alla cella campanaria in cui il valore è stato diminuito in riferimento alla struttura di sostegno del concerto campanario.

Queste variazioni sono giustificate sia in virtù del suo preminente sviluppo verticale, sia per gli importanti spessori riscontrati all'interno, particolarmente notevole poiché racchiudono le scale, sia perché non sono noti i materiali con i quali è stato effettuato il riempimento delle volte, chiusura orizzontale che ricorre in tutti i livelli.

Con ulteriori aggiustamenti, variando la massa e il coefficiente di Poisson è stato raggiunto un risultato ingegneristicamente accettabile.

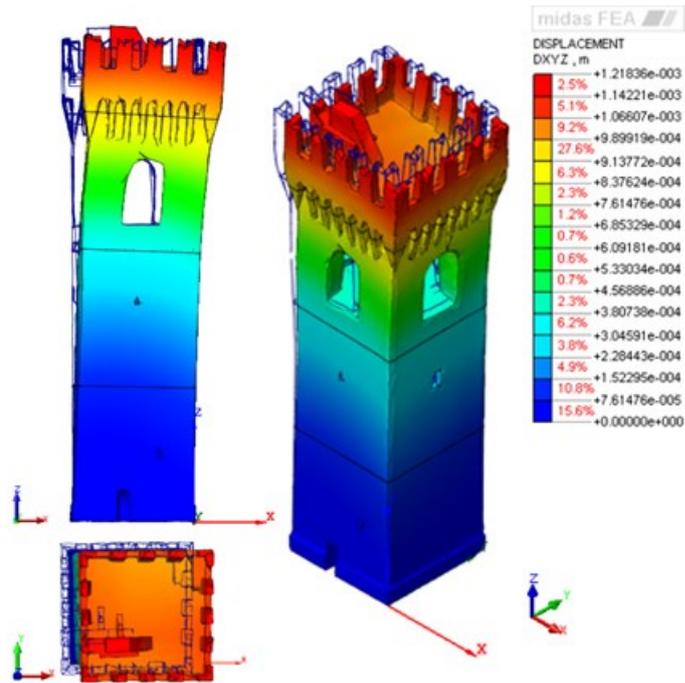
Figura 5.26 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello dalla Nuvola



OMA (Hz)	Modello _{Nuvola} (Hz)	Δf (%)
1,253	1,318	5,09

Modo 1	
Frequenza (Hz)	1,318
Periodo (s)	0,8091

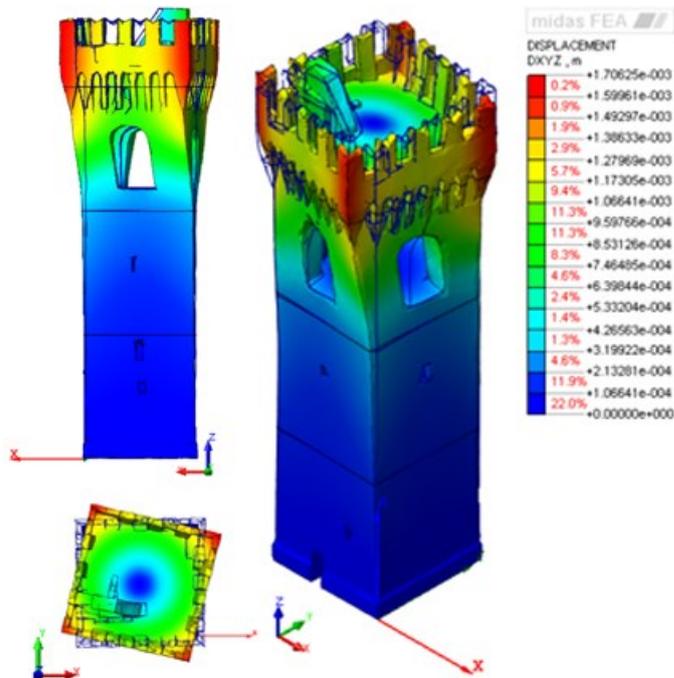
Figura 5.27 - Spostamenti e dati Modo 2 – Modello dalla Nuvola



OMA (Hz)	Modello Nuvola (Hz)	Δf (%)
1,432	1,339	6,51

Modo 2	
Frequenza (Hz)	1,339
Periodo (s)	0,7957

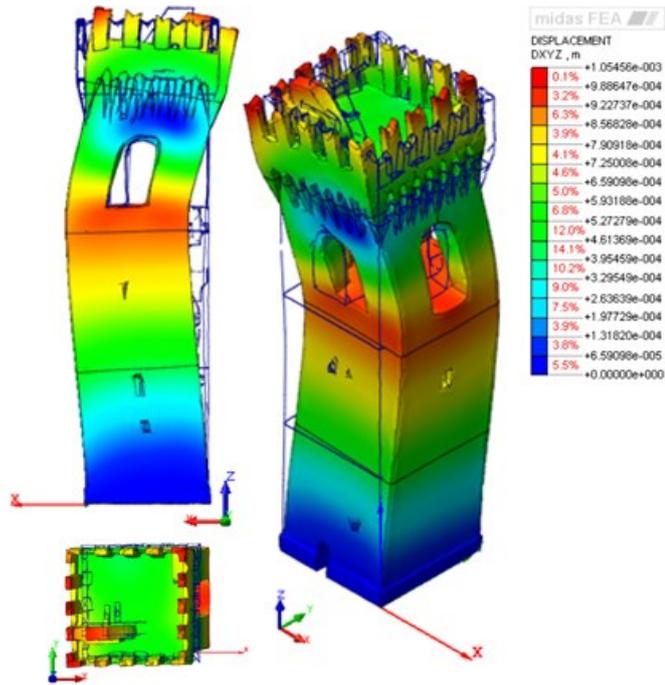
Figura 5.28 - Riferimenti e dati Modo 3 – Modello dalla Nuvola



OMA (Hz)	Modello Nuvola (Hz)	Δf (%)
2,985	2,951	1,09

Modo 3	
Frequenza (Hz)	2,951
Periodo (s)	0,2915

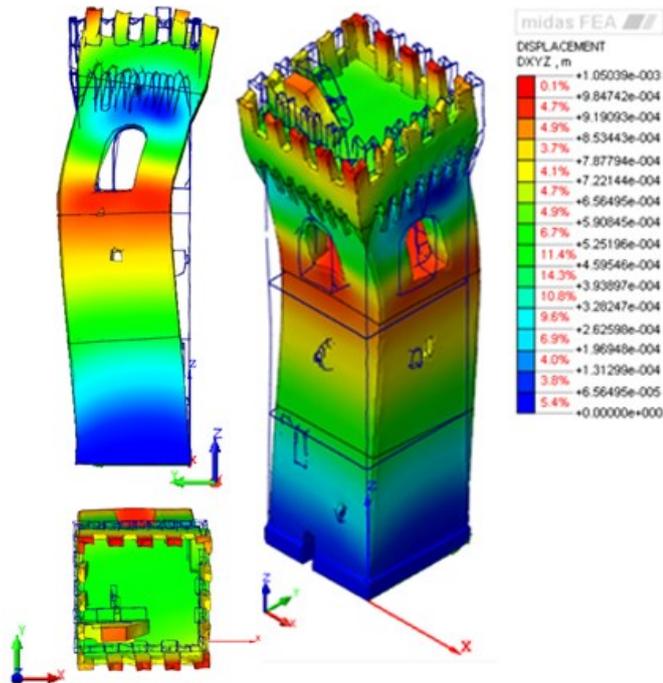
Figura 5.29 - Spostamenti e dati Modo 4 – Modello dalla Nuvola



OMA (Hz)	Modello Nuvola (Hz)	Δf (%)
4,938	4,984	0,91

Modo 4	
Frequenza (Hz)	4,984
Periodo (s)	0,1903

Figura 5.30 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello dalla Nuvola



OMA (Hz)	Modello Nuvola (Hz)	Δf (%)
5,535	5,0284	9,15

Modo 5	
Frequenza (Hz)	5,028
Periodo (s)	0,1873

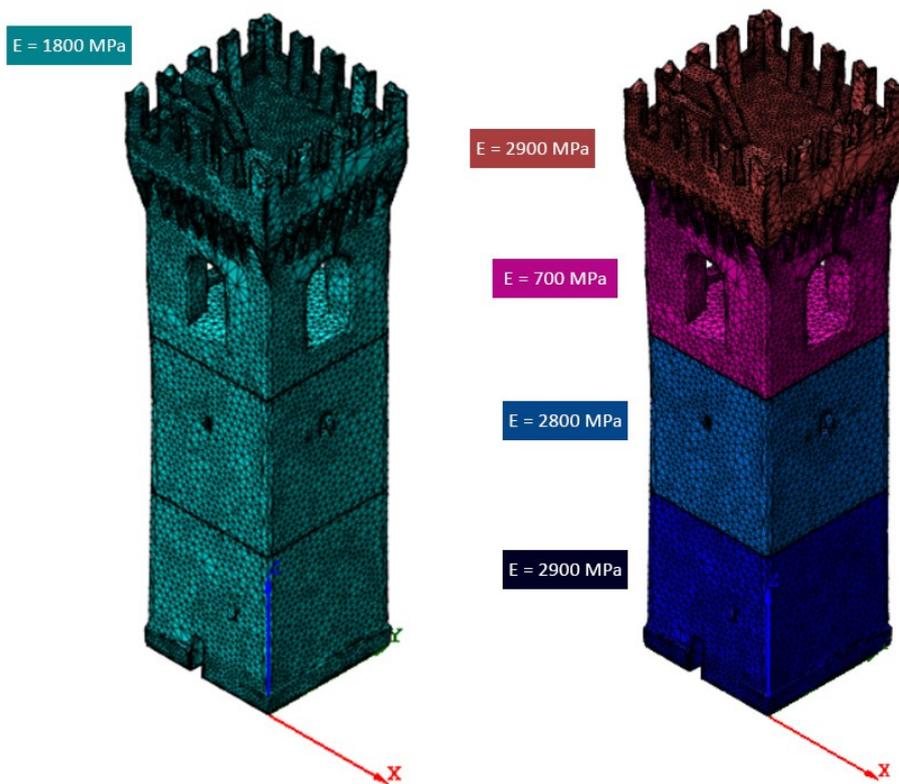


Figura 5.31 - Caratteristiche dei materiali prima e dopo la calibrazione

5.3.2 Calibrazione del modello diretto

Come già specificato nel §4.4.4, la Torre del Borgo è stata caratterizzata da un unico materiale, quale la muratura di mattoni pieni e malta di calce, con proprietà meccaniche $E=1800 \text{ N/mm}^2$ e $\rho = 18 \text{ kN/m}^3$, valori indicati nella normativa *NTC18*.

Inoltre, considerando che nella sua prima configurazione la Torre era addossata al Palazzo Comunale e che quindi era presente una porta interna di collegamento tra i due volumi in corrispondenza dell'attuale livello 3, ora chiusa, si è deciso di separare la muratura del lato est nel modello, essendo questa meno rigida.

Osservando le frequenze dei primi due modi, il primo traslazionale in X e il secondo traslazionale in Y, e confrontandole con quelle sperimentali, risulta che, mentre quella del primo modo è già calibrata, quella del secondo modo deve essere aumentata ma, modificando i parametri della muratura in questo senso, anche la frequenza del primo

crebbe. Di conseguenza il corpo centrale è stato diviso in ulteriori tre parti in modo da intervenire separatamente lungo ciascuna direzione.

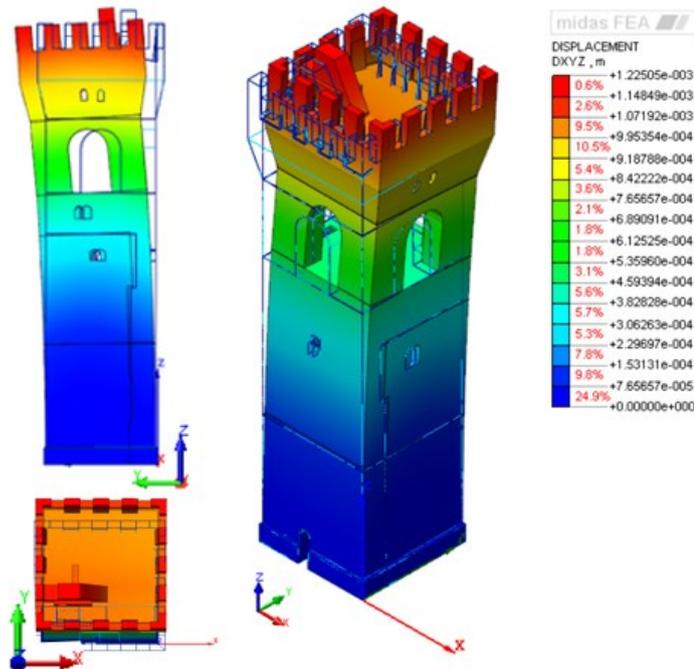
La frequenza del terzo modo è, nel modello numerico, più alta rispetto al valore da raggiungere per la calibrazione: essendo il terzo un modo torsionale attorno all'asse Z (verticale) e notando dalla deformata che questo ha azione principalmente in sommità, si è proseguito separando la corona esterna, costituita da beccatelli e merli, dal nucleo centrale, per attribuire a questa un momento di inerzia rotazionale maggiore.

Infatti, operando localmente sulla corona esterna è stato possibile ridurre la frequenza del modo 3 limitando l'influenza sugli altri.

Con ulteriori correzioni anche i modi 4 e 5 sono stati modificati, ottenendo un risultato ingegneristicamente accettabile.

Di seguito i risultati della calibrazione del modello diretto.

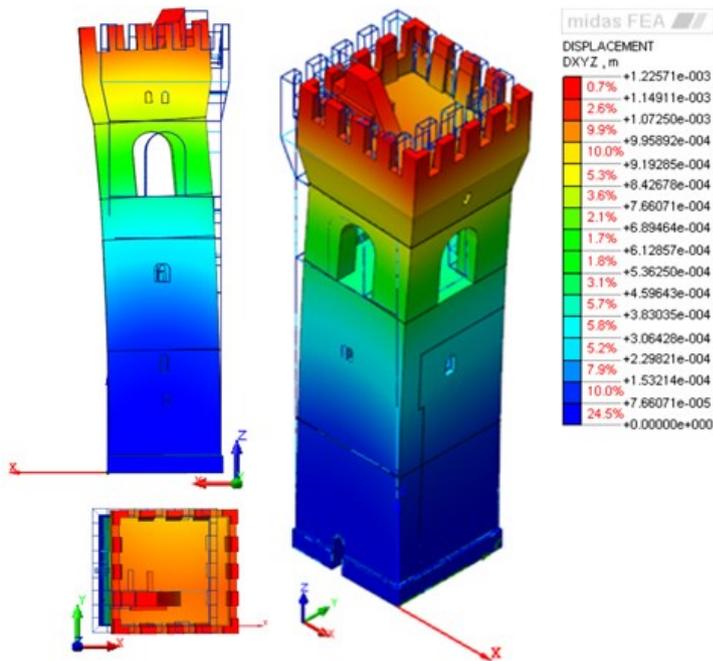
Figura 5.32 - Spostamenti e dati Modo 1 – Modello da Autocad



OMA (Hz)	Modello Autocad (Hz)	Δf (%)
1,253	1,307	4,26

Modo 1	
Frequenza (Hz)	1,307
Periodo (s)	0,76075

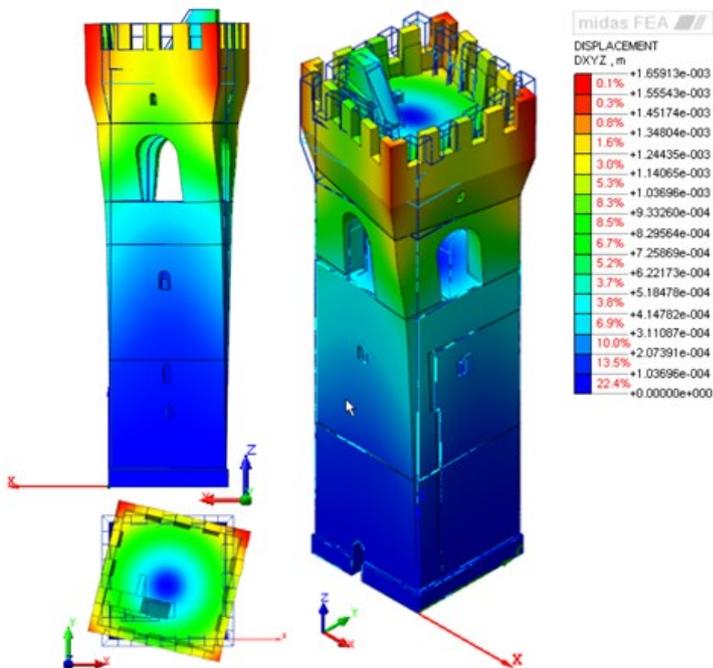
Figura 5.33 - Spostamenti e dati Modo 2 – Modello da Autocad



OMA (Hz)	Modello Autocad (Hz)	Δf (%)
1,432	1,361	4,93

Modo 2	
Frequenza (Hz)	1,361
Periodo (s)	0,73657

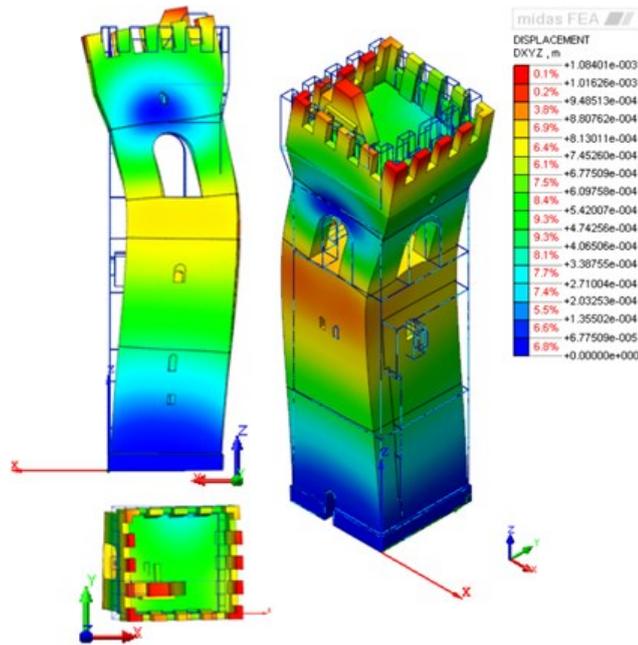
Figura 5.34 - Spostamenti e dati Modo 3 – Modello da Autocad



OMA (Hz)	Modello Autocad (Hz)	Δf (%)
2,985	3,146	5,42

Modo 3	
Frequenza (Hz)	3,146
Periodo (s)	0,31519

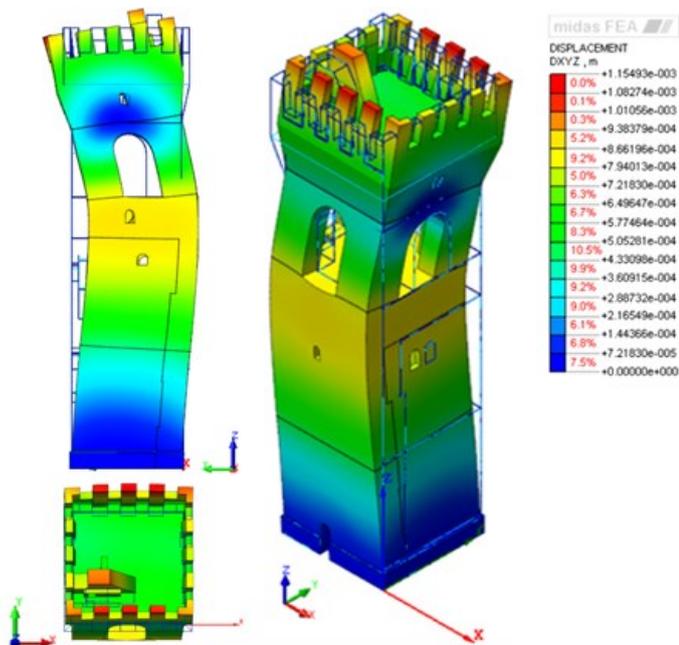
Figura 5.35 - Spostamenti e dati Modo 4 – Modello da Autocad



OMA (Hz)	Modello Autocad (Hz)	Δf (%)
4,938	5,162	4,51

Modo 4	
Frequenza (Hz)	5,162
Periodo (s)	0,19364

Figura 5.36 - Spostamenti e dati Modo 5 – Modello da Autocad



OMA (Hz)	Modello Autocad (Hz)	Δf (%)
5,535	5,222	5,66

Modo 5	
Frequenza (Hz)	5,222
Periodo (s)	191351

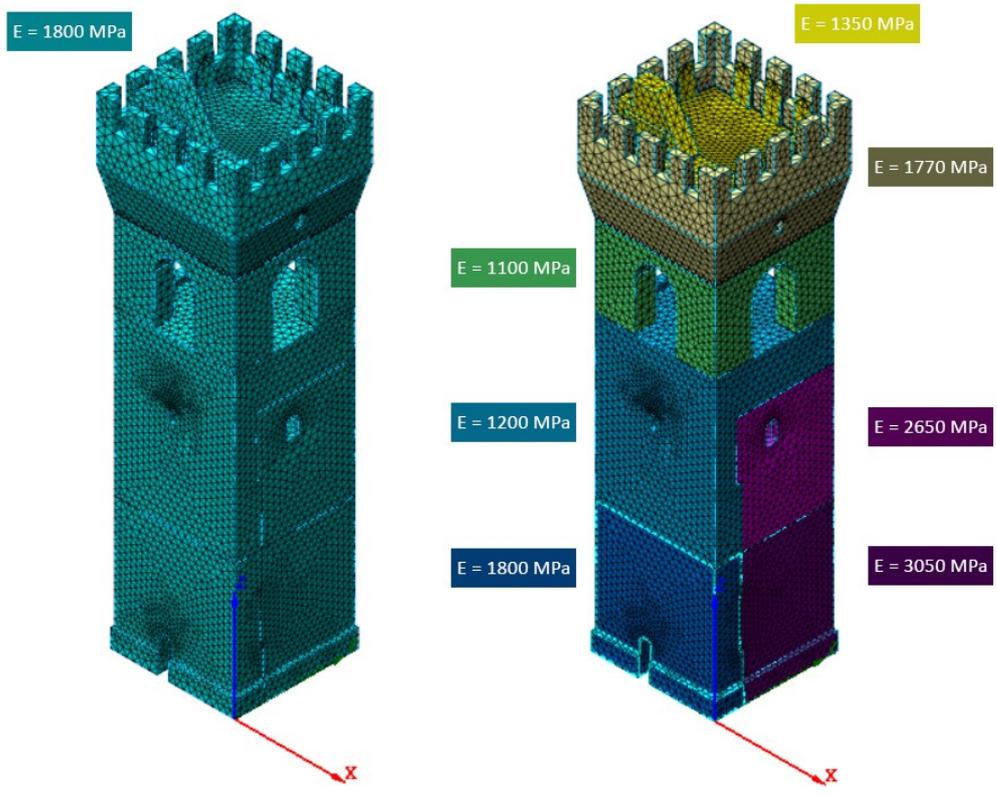


Figura 5.37 - Caratteristiche dei materiali prima e dopo la calibrazione

6 Conclusioni

Il patrimonio storico monumentale deve essere tutelato, oggi più di ieri, affinché si conservi e continui a raccontare la storia del nostro territorio: grazie alla commistione tra la disciplina del rilievo e quella dell'analisi strutturale ciò è possibile.

Condividendo questo importante presupposto e in linea con i progetti sperimentali di ricerca, sono stati realizzati, in questa sede, un modello mediante modellazione classica e uno derivante dai dati di scansione del laser scanner ed è stata effettuata su entrambi una analisi agli elementi finiti.

Questa scelta deriva dal fatto che l'aver piena conoscenza di un edificio storico sia difficile, quindi qualsiasi tipo di indagine strutturale rischia di basarsi su supposizioni e approssimazioni che, anche se motivate, non risultano essere sufficientemente precise da restituire le reali caratteristiche meccaniche dell'edificio.

In una tale prospettiva, oltre a rivolgere l'attenzione ai dettagli geometrici, affiancare alla modellazione numerica delle misurazioni sperimentali permette di eliminare o ridurre questa aleatorietà.

Il primo *step*, quello relativo alla realizzazione dei modelli, è stato incentrato principalmente sull'elaborazione della *point cloud* e sulla conversione di quest'ultima in un solido chiuso da importare nel *software* di calcolo *Midas FEA*.

La difficoltà più grande, oltre all'interoperabilità dovuta alla necessità di adoperare specifici programmi per operare delle singole azioni, è stata quella di riuscire a preservare i caratteri più salienti della torre, in particolare in corrispondenza dei merli e dei beccatelli, e di riuscire a gestire il modello dividendolo in più parti.

Benché la nuvola di punti sia stata convertita in mesh in *Geomagic*, solo il successivo passaggio in *3D Reshaper* ha permesso di ovviare al problema dell'approssimazione della forma geometrica e alla riparazione dell'integrità della maglia superficiale: a questo proposito, si suggerisce, per il futuro, di eseguire questa fase all'interno del solo software *3D Reshaper*, poichè contiene strumenti analoghi a *Geomagic*, ma più efficaci.

Per quanto riguarda la possibilità di dividere il solido, una svolta decisiva è stata la lavorazione in *Inventor*: attraverso il formato STEP, la *polisuperficie* chiusa è stata importata all'interno del programma, dotato di un set di comandi che permettono di eseguire agevolmente tale suddivisione.

Per quanto riguarda la realizzazione del modello diretto, la modellazione è stata eseguita in *Autocad* sia per via della complessità della configurazione interna, sia per aggirare la modellazione in *Midas FEA*, che, personalmente, avrebbe richiesto tempi superiori.

Il software *Autocad* ha però l'inconveniente di non supportare il formato *STEP*: ancora una volta si ricorre a *Inventor*, quale mezzo per l'esportazione del solido nell'estensione necessaria.

Per snellire ulteriormente questa fase, si suggerisce, qualora si voglia evitare la modellazione in *Midas FEA*, di estrarre il modello direttamente in *Inventor*.

In entrambi i *workflow* il passaggio tramite *Inventor* si è rivelata una scelta strategica e risolutiva: essendo un programma noto e facilmente reperibile, non solo rende questo step ripetibile e applicabile ad altri casi studio, ma è anche un ottimo strumento per elaborare ulteriormente il solido e dividerlo ad hoc secondo le esigenze della analisi strutturale, compatibilmente con la sua partizione architettonica.

La seconda parte della tesi riguarda l'identificazione dinamica e la successiva calibrazione dei modelli: ciò che induce all'utilizzo, sempre più diffuso, di queste tecniche è l'esigenza di conoscere i parametri dinamici delle strutture in condizioni di esercizio, al fine di prevederne il possibile comportamento e le prestazioni in condizioni estreme, come nel caso di eventi sismici.

Sottoponendo la Torre del Borgo alla sola eccitazione ambientale, sono state estratte le caratteristiche dinamiche: l'analisi modale operativa è quindi uno strumento flessibile, che si presta al monitoraggio continuo, il cui scopo non consiste solo nell'identificazione di danni improvvisi o progressivi ma anche nel controllo della funzionalità della struttura in condizioni di esercizio.

Affiancando le misure sperimentali alla modellazione numerica è stato possibile, attraverso la calibrazione, validare le ipotesi fatte circa la distribuzione delle masse e delle rigidità. Confrontando i risultati dell'analisi modale prima della calibrazione è stato osservato che i valori delle frequenze del modello dalla nuvola sono leggermente più basse rispetto a quelle del modello diretto e che la calibrazione è avvenuta, per entrambi, variando le principali caratteristiche meccaniche della muratura.

Questo studio, dunque, contribuisce a rinforzare la replicabilità dell'iter proposto e auspica che tale *workflow* possa essere affinato e migliorato per poter assurgere a un ruolo di rilievo nell'ambito delle analisi strutturali.

Bibliografia

- Bacchetto, A. (2016). *Introduzione al metodo agli elementi finiti e alla modellazione FEM*.
 Disponibile Online:
http://www.ingegneriastrutturale.net/documenti/articoli/adepron13_0012.pdf.
 : Adepron.
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Oreni, D., Previtali, M., . . . Schiantarelli, G. (2015). BIM from laser clouds and finite element analysis: combining structural analysis and geometric complexity. *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, (p. 345-350). Avila.
- Bitelli, G., Castellazzi, G., D'Atri, A. M., De Miranda, S., Lambertini, A., & Selvaggi, I. (2016). Automated voxel model from point cloud for structural analysis of cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry; Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, (p. 191-197). Praga.
- Buschi, F., & Buschi, R. (2000). *Le Ricordanze. Recanati 1898-1939. Storia, costume e società*. Tecnostampa.
- Caroti, G., Franconi, A., & Piemonte, A. (2012). Metodologia di elaborazione dati di laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale. *Atti 16ª Conferenza Nazionale ASITA (Federazione italiana delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali)*, (p. 383-390). Vicenza.
- Clementi, F., Gazzani, V., Poiani, M., & Lenci, S. (2016, Settembre). Assessment of seismic behaviour heritage masonry buildings using numerical modelling. *Journal of Building Engineering*, p. 29-47.
- Clementi, F., Perdicca, A., Formisano, A., Catinari, F., & Lenci, S. (2017). Numerical model upgrading of a historical masonry building damaged during the 2016 Italian earthquakes: the case study of the Podestà palace in Montelupone (Italy). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 703-717.
- Clini, P., El Mehtedi, M., Nespeca, R., Ruggeri, L., & Raffaelli, E. (2017). A digital reconstruction procedure from laser scanner survey to 3D printing: the theoretical model of the Arch of Trajan (Ancona). *SCIRES-IT Scientific REsearch and Information Technology*, 7 (2), 1-12.
- Clini, P., Quattrini, R., Fiori, F., & Nespeca, R. (2013). Integrated technologies for surveying artefacts damage by earthquakes. Application of all-in-one LIDAR

- techniques in the city of l'Aquila. *XXIV International CIPA Symposium, 2 –*, (p. 79-84). Strasburgo.
- Di Tommaso , A., & Casacci, S. (2013). Sopravvivenza di torri e campanili in ambiente simsico. *CIAS Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico*, (p. 1-24).
- Docci , M. (2007). *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Roma: Gangemi Ed.
- Docci , M., & Maestri, D. (2009). *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Bari: Laterza.
- Doglioni, F., Moretti, A., & Petrini, V. (1994). *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*. Trieste: Lint Editoriale Associati.
- Ercan, T., & Çakti, E. (2017). Use of laser scanning in civil and earthquake engineering. *4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, (p. 1-8). Eskisehir.
- Guidi, G., & Remondino, F. (2012). 3D Modelling from Real Data. In *Modelling and Simulation in Engineering* (p. DOI: 10.5772/30323). Catalin Alexandru.
- Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., . . . Yao, J. T. (1997). Structural control. Past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*.
- Isidori, D., Perdicca, A., Concettoni, E., Clementi, F., & Lenci , S. (2015). Structural health monitoring applications with wireless sensors on an historical masonry building. *XXII congresso AIMETA - Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata*, (p. 287-296).
- Korumaz, M., Betti, M., Conti , A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., . . . Fiorini , L. (2017, Ottobre). An integrated terrestrial laser scanner (TLS), deviation analysis (DA) and finite element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, p. 224-238.
- Laefer, D. F., & Truong-Hong, L. (2017, Febbraio 1). Toward automatic generation of 3D steel strucyures for building information modelling. *Automation in construction*, p. 66-77.
- Mondello, A. (2013). Traditional bell towers: knowledge and safety in two compared areas. *TEMA Technologies Engineering materials Architecture*, 124-135.

- Nespeca, R. (2018). *Documentazione digitale per il Culturale Heritage. Point Cloud come sistema informativo*. Canterano: Aracne editrice.
- Quagliarini, E., Clini, P., & Ripanti, M. (2017). Fast, low cost and safe methodology for assessment of state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: the case study of Santa Maria in Portonovo (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, p. 175-183.
- Quattrini, R., Clementi, F., Lucidi, A., Giannetti, S., & Santoni, A. (2019). From TLS to FE analysis: point cloud exploitation for structural behaviour definition. The San Ciriaco's bell tower. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Scien*, (p. 957-964). Àvila.
- Quattrini, R., Malinverni, E. S., Clini, P., Nespeca, R., & Orlietti, E. (2015). From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modelling of complex architecture. *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, (p. 367-374). Avila.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Record*, 269-291.
- Rinaudo, F. (2011). *Geomatica e Archeologia. In Metodologie e strumenti per la conservazione e il restauro*. Napoli: Genovese Arte Tipografia.
- Rizzi, A., Voltolini, F., Girardi, S., Gonzo, L., & Remondino, F. (2007). Digital preservation, documentation and analysis of paintings, monuments and large cultural heritage with infrared technology, digital cameras and range sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (p. 631-636). Atene.
- Vallucci, S., Quagliarini, E., & Lenci, S. (2013). *Costruzioni storiche in muratura. Vulnerabilità sismica e progettazione degli interventi*. Milano: Wolters Kluwer Italia.
- Visintini, D., & Spangher, A. (2015). Il livello di dettaglio dei modelli 3D geomatici per l'analisi strutturale FEM. *Atti 19ª Conferenza Nazionale ASITA (Federazione italiana delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali)*, (p. 755-762). Lecco.

Sitografia

<http://www.comune.recanati.mc.it/index.php/territorio/la-storia>

<https://www.corriereproposte.it/cosa-sapere/recanati-la-storia>

<http://esse1-qis.mi.ingv.it>

<https://www.arcgis.com>